

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE
INSTALACIONES EN RESPUESTA A SITUACIONES
DE EMERGENCIA CONSIDERANDO INDICADORES
DE ACCESIBILIDAD

POR

BEATRIZ ALEJANDRA JIMÉNEZ LÓPEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

MAYO 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE
INSTALACIONES EN RESPUESTA A SITUACIONES
DE EMERGENCIA CONSIDERANDO INDICADORES
DE ACCESIBILIDAD

POR

BEATRIZ ALEJANDRA JIMÉNEZ LÓPEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

MAYO 2019

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Problema de localización de instalaciones en respuesta a situaciones de emergencia considerando indicadores de accesibilidad», realizada por el alumno Beatriz Alejandra Jiménez López, con número de matrícula 1520995, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro

El Comité de Tesis



Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa

Asesor



Dr. Omar Jorge Ibarra Rojas

Revisor



Dr. Leonardo Gabriel Hernández Landa

Revisor

Vo.Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, mayo 2019

*A José Roberto, José Robertito, Alita
y los que estén por llegar, ustedes son la razón de mi vida.*

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	XI
Resumen	XII
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Objetivo	2
1.3. Hipótesis	3
1.4. Justificación	3
1.5. Metodología	4
1.6. Estructura de la tesis	4
2. Marco teórico	5
2.1. Logística humanitaria	5
2.1.1. Origen de la logística humanitaria	6
2.1.2. El concepto de logística humanitaria	6
2.1.3. Clasificación de la logística humanitaria	8

2.2. Problema de localización	9
2.2.1. Eficiencia y justicia espacial	11
2.3. Accesibilidad	12
2.4. Algoritmos aproximados	14
2.4.1. Algoritmos heurísticos	15
2.4.2. Aplicación de heurísticos	16
3. Formulación propuesta	18
3.1. Descripción del problema	19
3.2. Medida de accesibilidad	20
3.3. Formulación matemática	22
4. Resultados de la formulación matemática	25
4.1. Diseño de la experimentación	25
4.2. Resultados en CPLEX	26
4.2.1. Resultado de instancia tipo A	27
4.2.2. Resultado de instancia tipo B	28
5. Método heurístico	29
5.1. Algoritmo constructivo	29
5.2. Búsqueda local	32
5.2.1. Búsqueda local 2-opt de la primera mejora	32

5.2.2. Búsqueda local 2-opt de la mayor mejora	33
6. Resultados de método heurístico	35
6.1. Resultado de una instancia tipo A, B y C.	35
6.2. Comparación de las búsquedas locales respecto al algoritmo constructivo	41
6.3. Comparación de resultados obtenidos mediante CPLEX y las búsquedas locales	44
7. Conclusiones	46
7.1. Conclusiones	46
7.2. Trabajo a futuro	48
A. Resultados de la formulación matemática	49
A.1. Resultados de instancias tipo A	49
A.2. Resultados de instancias tipo B	50
B. Resultados del método heurístico	52
B.1. Resultados de instancias tipo A	52
B.2. Resultados de instancias tipo B	56
B.3. Resultados de instancias tipo C	59

ÍNDICE DE FIGURAS

3.1. Ejemplo de ubicación de dos instalaciones entre 3 ubicaciones potenciales (indicadas con cuadrados) y 5 puntos de demanda (indicadas con círculos).	19
4.1. Resultado de la formulación matemática de una instancia A	27
4.2. Resultado de la formulación matemática de una instancia B	28
6.1. Resultados obtenidos para una instancia tipo A.	36
6.2. Resultados obtenidos para una instancia tipo B.	38
6.3. Resultados obtenidos para una instancia tipo C.	40
6.4. Comparación de mejoras del algoritmo constructivo mediante las búsquedas locales en las instancias A	42
6.5. Comparación de mejoras del algoritmo constructivo mediante las búsquedas locales en las instancias B	43
6.6. Comparación de mejoras del algoritmo constructivo mediante las búsquedas locales en las instancias C	43

ÍNDICE DE TABLAS

4.1. Tipos de instancias para el problema de localización de instalaciones.	26
4.2. Resultados numéricos de resolver las instancias generadas aleatoriamente utilizando el solucionador de CPLEX.	26
4.3. Resultado de la formulación matemática de una instancia A.	27
4.4. Resultado de la formulación matemática de una instancia B.	28
6.1. Resultados obtenidos de una instancia tipo A.	37
6.2. Resultados obtenidos de una instancia tipo B.	39
6.3. Resultados obtenidos de una instancia tipo C.	41
6.4. Comparación de mejoras obtenidas de la función objetivo del algoritmo constructivo mediante las búsquedas locales.	42
6.5. Comparación del gap y tiempo obtenido por cada metodología.	44
A.1. Resultados obtenidos por la formulación matemática para instancias A.	50
A.2. Resultados obtenidos por la formulación matemática para instancias B.	51
B.1. Resultados obtenidos por el algoritmo constructivo para instancias A.	53

B.2. Resultados obtenidos por la búsqueda local de la primera mejora para instancias A.	54
B.3. Resultados obtenidos por la búsqueda local de la mayor mejora para instancias A.	55
B.4. Resultados obtenidos por el algoritmo constructivo para instancias B.	56
B.5. Resultados obtenidos por la búsqueda local de la primera mejora para instancias B.	57
B.6. Resultados obtenidos por la búsqueda local de la mayor mejora para instancias B.	58
B.7. Resultados obtenidos por el algoritmo constructivo para instancias C.	59
B.8. Resultados obtenidos por la búsqueda local de la primera mejora para instancias C.	60
B.9. Resultados obtenidos por la búsqueda local de la mayor mejora para instancias C.	61

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Roberto por su apoyo y orientación con la programación del método heurístico, su ayuda con las explicaciones y tareas, y también por cuidar a Robertito para que yo realizara los trabajos y tareas de la maestría.

También quiero agradecer a la dra. Lucero Ozuna por el apoyo brindado a lo largo de la maestría, por su orientación y guía para sacar adelante el trabajo de tesis. Al dr. Omar Ibarra por su apoyo y orientación brindada. A todos los profesores que me dieron clase, por compartir su experiencia y conocimientos.

Finalmente, quiero agradecer por las becas de cuotas por Mérito Académico que brindaron la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y la Universidad Autónoma de Nuevo León. Además, de la beca de manutención que me brindó el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

RESUMEN

Beatriz Alejandra Jiménez López.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro .

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES EN RESPUESTA A SITUACIONES DE EMERGENCIA CONSIDERANDO INDICADORES DE ACCESIBILIDAD.

Número de páginas: 66.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: Las instalaciones de respuesta a situaciones de emergencia son necesarias para ubicar en ellas los recursos y provisiones que deben ser entregados a las personas afectadas por los desastres. El problema de localización dentro de la logística humanitaria tiene la finalidad de ubicar adecuadamente las instalaciones de ayuda para optimizar los tiempos de respuesta y la accesibilidad de las personas afectadas. En este trabajo se tiene como objetivo la creación de una herramienta cuantitativa para determinar la adecuada localización de las instalaciones de respuesta a situaciones de emergencia considerando algunos indicadores de accesibilidad como: el número de zonas con cobertura con las locaciones delimitadas, la distancia a las instalaciones de ayuda, el número de zonas con falta de cobertura, porcentaje de demanda de personas que es cubierto, el número de locaciones y la


disgregación geográfica.

Las herramientas utilizadas para resolver el problema de localización de instalaciones de emergencia fueron la programación lineal entera mixta y un método heurístico conformado por un algoritmo constructivo, una búsqueda local de la primera mejora y una búsqueda local de la mayor mejora.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: Las contribuciones de este trabajo son: la propuesta de una formulación matemática para resolver el problema de localización de instalación en caso de emergencia considerando las capacidades de las instalaciones potenciales y la demanda de los puntos afectados, además se adaptó la medida de accesibilidad propuesta por Ibarra-Rojas et al. [19] para nuestro problema en particular. Debido a que la obtención de la solución óptima requería mucho tiempo computacional, se propone la utilización de un método heurístico conformado por un algoritmo constructivo y dos búsquedas locales.

Como conclusión, pudimos determinar que la utilización de la formulación matemática requiere un gran tiempo computacional para obtener la solución óptima. Mientras, que el método heurístico obtiene resultados suficientemente buenos en un tiempo muy corto. Finalmente, se concluye que el método heurístico puede encontrar una solución factible para el tamaño más grande de casos probado en un par de minutos, cuando la formulación matemática no logra obtener una solución factible en el límite de tiempo establecido de una hora.

Firma del asesor:



Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La Real Academia Española define la logística como el «conjunto de medios y métodos necesarios para llevar a cabo la organización de una empresa o de un servicio, especialmente de distribución». Una rama de la logística es la denominada «logística humanitaria». La logística humanitaria es importante cuando sucede un desastre, ya que existe la necesidad de responder de manera rápida, ágil y efectiva con provisiones o servicios a los lugares afectados, en el momento adecuado y en la cantidad necesaria.

La logística humanitaria suele dividirse en diferentes fases: mitigación, preparación, respuesta y recuperación. La mitigación se refiere a las medidas que se pueden llevar a cabo para la prevención de un desastre o para aminorar su impacto. La preparación es que las personas estén bien informadas para saber como reaccionar ante un desastre. La recuperación se refiere a las medidas que se toman posterior al desastre para volver a la normalidad. Este trabajo se centra en la etapa de respuesta, en la cual se trata de la administración de los recursos con los que se cuentan para ser ubicados y entregados a las personas afectadas por el desastre.

Las instalaciones de respuesta a situaciones de emergencia son necesarias para ubicar en ellas los recursos y provisiones que deben ser entregados a las personas afectadas por los desastres. Además, en estas instalaciones se suelen ofrecer servicios

médicos.

El problema de localización dentro de la logística humanitaria tiene la finalidad de ubicar adecuadamente las instalaciones de ayuda para optimizar los tiempos de respuesta y la accesibilidad de las personas afectadas.

La accesibilidad es medida considerando diversos elementos e indicadores dependiendo el contexto, por ejemplo, mediante indicadores como la cantidad de instalaciones en un radio determinado, el tiempo en llegar a la instalación y el número de vueltas para llegar a la instalación por el camino más corto.

En este trabajo se generará una herramienta para determinar la adecuada localización de las instalaciones de respuesta a situaciones de emergencia considerando algunos indicadores de accesibilidad como: el número de zonas con cobertura con las locaciones delimitadas, la distancia a las instalaciones de ayuda, el número de zonas con falta de cobertura, porcentaje de demanda de personas que es cubierto, el número de locaciones y la disgregación geográfica.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Determinar la adecuada ubicación de las instalaciones de emergencia, conociendo el conjunto de puntos que requieren ayuda y su demanda, así como el conjunto de posibles ubicaciones de las instalaciones y su capacidad, teniendo un número máximo de instalaciones que se pueden abrir.

1.2 OBJETIVO

Generar una herramienta cuantitativa para obtener la correcta ubicación de las instalaciones de respuesta a situaciones de emergencia para incrementar la accesibilidad de las personas afectadas, considerando los indicadores de accesibilidad de la

cantidad de zonas cubiertas, disgregación espacial y cantidad de personas cubiertas .

1.3 HIPÓTESIS

Con la utilización de la herramienta cuantitativa propuesta se puede determinar la correcta ubicación de las instalaciones de respuesta a situaciones de emergencia aumentando la accesibilidad de las personas afectadas.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Según cifras de Wassenhove [39], en el mundo cada año suceden alrededor de 500 desastres, los cuales afectan aproximadamente a 200 millones de personas y cerca de 75,000 personas pierden la vida en dichos desastres.

Normalmente las demandas masivas generadas durante un desastre superan los recursos disponibles, por esta razón es de suma importancia que las instalaciones de respuesta se encuentren bien localizadas para cubrir a la mayor cantidad de personas posibles.

La logística humanitaria tiene la finalidad de planear, manejar y controlar el flujo de los recursos de ayuda para los afectados en un desastre [31].

Sin embargo, esta planeación de logística humanitaria normalmente se realiza de manera negligente. Según información obtenida por el Instituto FRITZ [20], en la práctica cuando suceden desastres naturales los planes de logística son dirigidos de manera manual, como lo fue en el caso del tsunami en el océano Índico en el año 2004 o en el terremoto de Haití en el año 2010.

1.5 METODOLOGÍA

Primero, se realizó una revisión de la literatura para analizar de qué manera se han ubicado las instalaciones de emergencia en diversos trabajos.

Después, se adaptó la medida de accesibilidad que utilizamos en el modelo, con base a la propuesta por Ibarra-Rojas et al.[19]. Para después presentar la formulación matemática para el problema de ubicación de instalaciones de emergencia, programarlo y realizar experimentación con diversos tamaños de casos diferentes.

Debido a que con la formulación matemática no se resuelven los casos más grandes de prueba en un tiempo computacional razonable, se decide trabajar en un método heurístico conformado por un algoritmo constructivo y una búsqueda local.

Finalmente, se presentan los resultados del método heurístico y su análisis, así como las conclusiones y trabajo a futuro.

1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Este trabajo de investigación está organizado de la siguiente manera: en el capítulo 2 se presenta una revisión de los temas acerca de logística humanitaria, accesibilidad y el problema de localización de instalaciones. En el capítulo 3 se presentan la descripción del problema y la formulación matemática propuesta. En el capítulo 4 se encuentran los resultados de la formulación matemática. En el capítulo 5 se presenta el método heurístico propuesto para solucionar el problema de localización de instalaciones. En el capítulo 6 se presentan los resultados obtenidos por el método heurístico. Finalmente, en el capítulo 7 se describen las conclusiones y el trabajo a futuro.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta el marco teórico investigado con referencia a la localización de instalaciones de respuesta a situaciones de emergencia. En primer lugar, se define el concepto de logística humanitaria. Después se describe el problema de localización. Finalmente se habla acerca de los temas referentes a accesibilidad.

2.1 LOGÍSTICA HUMANITARIA

En las operaciones de emergencia la logística es de vital importancia, ya que se requiere para organizar e implementar las acciones de respuesta para que sean rápidas, ágiles y efectivas. Un sistema logístico es necesario para llevar a cabo de manera eficiente la movilización del personal, del equipo y del material que se requiere al para que las organizaciones que brindan asistencia realicen su trabajo, además también se requiere para planear las actividades de evacuación de heridos y reubicación de poblaciones afectadas por el desastre [15].

2.1.1 ORIGEN DE LA LOGÍSTICA HUMANITARIA

Los primeros modelos de optimización en logística humanitaria fueron desarrollados a finales de 1970 desde que sucedieran muchos desastres marítimos en los 60tas y 70tas, como lo fueron el derrame de navío Torrey Canyon en la costa inglesa en 1967 y el derrame de Argo Merchant cerca de Massachusetts en 1976. Debido a esto el presidente Carter en 1977 pidió que se hicieran estudios inmediatos para poder responder exitosamente a derrames de hasta 100,000 toneladas de petróleo en cualquier mar territorial de los Estados Unidos en 6 horas [5]. Los primeros modelos de optimización se enfocaban en derrames petroleros y en desastres marítimos en general [5]. A partir de 1980 las investigaciones han también explorado otras emergencias a larga escala como son los huracanes, inundaciones y terremotos [1].

2.1.2 EL CONCEPTO DE LOGÍSTICA HUMANITARIA

Un desastre es el resultado de un vasto evento ecológico entre las relaciones del hombre y su ambiente [17]. Puede ser de origen natural (terremotos, inundaciones, huracanes) o antropogénicos (ataques terroristas, derrames químicos). Cada año ocurren alrededor de 500 desastres en nuestro planeta matando a cerca de 75,000 personas e impactando a más de 200 millones [39]. Los desastres generan demandas masivas que seguido superan a los recursos.

El proceso de planeaciones, manejo y control en el flujo de dichos recursos que provean alivio a la gente afectada son llamada logística de emergencia «humanitaria» [31]. Sin embargo, la planeación sistemática de la logística humanitaria es seguida negligente. Por ejemplo, el Instituto FRITZ [20] ha observado que los planes de logística durante el tsunami en el océano índico del 2004 fueron dirigidos manualmente sin la presencia de expertos en logística. Al día de hoy la situación no ha cambiado y en el 2010 con el terremoto de Haití se muestra la falta de la planeación por expertos.

Los retos clave en la planeación de la logística humanitaria comparada con los casos de la logística de negocios son resaltados por Balicik y Beamon [4] y por Sheu [31] principalmente:

- Incertidumbres adicionales (camino inservibles, problemas de seguridad, cambios en la capacidad de las instalaciones, demandas inciertas).
- Comunicación y coordinación compleja (daños en las líneas de comunicación, demasiados terceros, gobierno y civiles, inaccesibilidad a demanda a tiempo real).
- Dificultad para alcanzar eficiencia y tiempos de envío.
- Los limitados recursos son seguidos sobrepasados por la escala de la situación (suministros, gente, capacidad de transporte, combustible).

Apte [3] define la logística humanitaria como: «Un elemento crítico de un proceso de alivio de desastres efectivo. Definimos la logística humanitaria como una rama especial de la logística que gestiona la cadena de suministro para dar respuesta mediante bienes y servicios críticos, con desafíos tales como oleadas de demanda, suministros inciertos, ventanas de tiempo crítico, de cara a vulnerabilidades de la infraestructura y alcance y el tamaño de las operaciones».

Según Stephenson [33] la cadena logística de los suministros de emergencias tiene la tarea principal de: «entregar las provisiones apropiadas, en buenas condiciones y en las cantidades solicitadas, en los lugares y en el momento en que son requeridas». Aunque los componentes de esta cadena logística no necesariamente son secuenciales y en diversas ocasiones se llevan a cabo de manera paralela y simultánea, éstas deben considerarse integralmente y no verse como actividades por separado porque tienen una relación vinculante [15].

Según la OPS [15] las partes de dicha cadena logística son:

- El abastecimiento: Este consiste en poner al servicio de las organizaciones que se encargan de la asistencia, los recursos identificados como necesarios y solicitados para la atención de las necesidades detectadas, para lo que se requiere también la identificación de las fuentes y las formas de adquisición.
- El transporte: Es el medio para hacer llegar los suministros al sitio donde son necesarios y cuya estrategia debe tomar en cuenta no solamente los medios requeridos sino las posibilidades reales y las alternativas para la entrega pronta y segura de la asistencia.
- El almacenamiento: Permite proteger los suministros mediante un sistema organizado, hasta que puedan ser entregados a su destino final y prever las dotaciones de reserva para necesidades ulteriores.
- La distribución: El gran objetivo de toda la cadena logística y consiste en entregar la asistencia a las personas afectadas por el desastre o a las organizaciones encargadas de su manejo, procurando que esta sea proporcional, equitativa y controlada para evitar los abusos y el desperdicio.

2.1.3 CLASIFICACIÓN DE LA LOGÍSTICA HUMANITARIA

Tufekci y Wallace [38] clasifican las respuestas de emergencia en dos etapas: la respuesta previa y posterior al evento. La etapa previa al evento hace referencia a la predicción y análisis de los peligros potenciales, así como los planes de acción de mitigación. Mientras que la etapa posterior al evento hace referencia a ubicar, asignar, coordinar y administrar los recursos con los que se cuentan. Según estos autores para que un plan de respuesta de emergencia sea eficaz deberá integrar estas etapas en su objetivo.

Tomasini y Van Wassenhove [35] a diferencia de los anteriores autores dividen la gestión de ayuda humanitaria de emergencia en cuatro etapas más específicas: mitigación, preparación, respuesta y rehabilitación. Las primeras dos se llevan a cabo

antes de que suceda el desastre. La etapa de mitigación se refiere a la implementación de medidas preventivas para suavizar el efecto que tendría un desastre natural. La etapa de preparación trata acerca de la planificación de las acciones que deberán realizar al presentarse un desastre. La etapa de respuesta se lleva a cabo durante y después del desastre, ésta tiene la finalidad de valorar el impacto del desastre, así como de implementar las acciones de salvamento y atención a las víctimas del desastre. Por último, se encuentra la etapa de rehabilitación, la cual consiste en tratar de volver a la normalidad.

2.2 PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN

El problema de localización óptima de instalaciones se presenta en diferentes áreas y contextos. Para la resolución de dicho problema se han utilizado técnicas de investigación de operaciones [27]. Las primeras soluciones para el problema localización de instalaciones fueron formulados en 1961 y se han desarrollado hasta la actualidad. En los problemas básicos de localización óptima se consideran un solo producto con instalaciones de capacidad ya sea limitada o ilimitada [21]. Dichos problemas básicos son considerados de carácter discreto y son divididos en dos grupos: los modelos de locación de la mediana y los modelos de centro y cobertura [29]. Existe también otro grupo de problemas que son considerados probabilísticos, ya que en ellos consideran la incertidumbre e información imperfecta como afectación de la respuesta que se espera. Dichos problemas probabilísticos se dividen en aleatorios, de peligro y de gran incertidumbre [21].

Según Marianov y ReVelle [24] los objetivos del problema de localización en el sector privado usualmente son la minimización de costos y la maximización de beneficios, mientras que en el caso de la ayuda humanitaria el objetivo es la optimización de la accesibilidad y el tiempo de respuesta. En el caso de que el tiempo de respuesta sea el criterio más importante, entonces el tipo que más se adecuaba a este problema es el de cobertura [30].

Los problemas de localización denominados de cobertura tienen la finalidad de establecer las instalaciones en los lugares disponibles para cubrir con la demanda. En 1971 Toregas et al. [37] introdujeron este tipo de problemas utilizando programación lineal entera para minimizar el número de ambulancias necesarias para cubrir cierta demanda. Posteriormente en 1974 Church y Revelle [12] introdujeron un problema alternativo a este, que fue denominado como Modelo de Localización de Máxima Cobertura, en el cual se maximizaba la población cubierta con una limitada cantidad de ambulancias disponibles. Los problemas de máxima cobertura tienen la finalidad de maximizar el total de personas cubiertas en una distancia máxima con un determinado número de instalaciones.

Bosque y Moreno [9] definen los problemas de localización-asignación como «Un conjunto de procedimientos matemáticos que intentan buscar soluciones al problema de donde situar centros de servicios (en sentido amplio) de manera que se optimicen ciertos valores considerados importantes a la hora de que los usuarios utilicen dichos servicios». Este tipo de metodologías fueron diseñados en su mayoría para determinar la localización óptima de una o varias instalaciones deseables, de la manera que se pueda obtener la mejor distribución espacial en cuanto a la minimización de costos o los tiempos de transporte.

Existen trabajos con diversos enfoques y características. En 2011 Acosta y Almendras [2] propusieron un modelo matemático considerando los albergues existentes para direccionar a las personas afectadas por un desastre al albergue más cercano a su vivienda y que tenga capacidad disponible, considerando la oferta disponible y la demanda de los lugares. Posteriormente, en el año 2013 Cornejo et al. [13] proponen un modelo matemático basado en programación lineal con la finalidad de determinar la localización de almacenes para la distribución de ayuda humanitaria, de manera que los vehículos recorran la menor distancia posible, en dicho trabajo se considera la capacidad de los almacenes y la atención total de los damnificados.

Recientemente, en el 2017 Canales y Vergara [10] propusieron un modelo ma-

temático con el objetivo de minimizar la distancia que deben recorrer las personas desde su hogar hasta sus respectivos refugios y el cambio entre ellos, ya que se consideran dos tipos de refugios, uno normal y otro cuando se requiere atención médica y se considera la capacidad de los albergues. También en el año 2017, Morales y Palacios [26] proponen una heurística con el objetivo de minimizar el tiempo total de atención y minimizar el tiempo de viaje entre centros de demanda y albergues, considerando su capacidad y la cobertura total de la demanda.

2.2.1 EFICIENCIA Y JUSTICIA ESPACIAL

Según Bosque Sendra [7] los modelos de localización-asignación consideran dos magnitudes: la eficiencia espacial de la localización de los centros de servicio y la justicia espacial de su distribución en el territorio.

La eficiencia espacial hace referencia al volumen global de desplazamientos que el conjunto de la demanda tiene que realizar para poder hacer uso de las instalaciones, además de tratar de medir el coste, tiempos de recorrido o bien, la distancia que la población tiene que recorrer para usar las instalaciones. Según McAllister (1976) dicha distancia tiene un coste que se busca reducir lo más posible, además la eficiencia puede medirse en función de los beneficios netos.

La justicia espacial hace referencia a la accesibilidad diferencial de un servicio a los diversos grupos de población, o sea, al grado de igualdad en la distribución de los servicios que presta cada instalación a la población. Es decir, en este caso la justicia espacial depende de la mayor o menor facilidad de acceso y depende de varios factores: la variabilidad de distancias que separan a cada individuo de la instalación más próxima, el tamaño de la oferta existente en la instalación y la disponibilidad de los servicios [7]. Bosque y Maass [8] destacan la importancia de la justicia espacial en el caso de servicios ofrecidos por la Administración Pública debido a que como son financiados por la toda la población, todos tienen iguales derechos de usarlos en

las mismas condiciones de accesibilidad.

2.3 ACCESIBILIDAD

Según Handy y Niemer [18] la accesibilidad está determinada por la distribución espacial de los destinos potenciales u oportunidades, la facilidad para llegar a ellos, la magnitud, la calidad y el carácter de las actividades encontradas.

Dichas oportunidades se refieren a las ubicaciones donde las personas pueden llevar a cabo actividades como compras, educación, trabajo, o sea, es la accesibilidad activa de una persona. Mientras que la accesibilidad pasiva se refiere al número de usuarios potenciales para el establecimiento. Estas oportunidades pueden ser vistas de dos maneras: a manera de nivel elemento que considera las oportunidades desagregadas y a nivel zona que considere las oportunidades agregadas [11].

Según Bocarejo y Oviedo [6] se entiende como accesibilidad a la facilidad con la que es alcanzado un destino deseado dado un número de oportunidades disponibles y considerando la intrínseca impedancia de los recursos necesarios para trasladarse al destino desde el origen.

Según Papa et al., Geurs et al. y Handy y Niemer [28, 16, 18], existen diferentes perspectivas que son consideradas básicas para medir la accesibilidad:

- Basadas en infraestructura: Estas medidas analizan el desempeño de la infraestructura del transporte en cuestiones como el nivel de congestión y la velocidad promedio del traslado.
- Basadas en ubicación: Estas medidas describen el nivel de accesibilidad a las actividades espacialmente distribuidas. En medidas como distancia, ponderación de las oportunidades respecto a impedancia, tiempo de traslado o costos.
- Basadas en la persona: Se refieren a las actividades en las que puede participar

un individuo en cierto momento.

- Basadas en la utilidad: Se refieren al beneficio económico que obtendrá una persona al acceder a ciertas actividades distribuidas espacialmente.
- De contorno o acumulativas: Son las medidas que representan la accesibilidad de una ubicación a otra, o bien a un grupo de destinos, considerando el número de oportunidades que pudieran alcanzarse en determinado tiempo.
- De red: Son las medidas que son basadas en la teoría de grafos.

Makrí y Folkesson [23] aseguran que no existe una medida de accesibilidad general, ya que debido a las diferentes situaciones, éstas dependerán del enfoque que se maneje.

Cascetta [11] define la accesibilidad integral como la cantidad promedio de oportunidades disponibles que cuentan con una ubicación potencial considerando las restricciones de tiempo y espacio de un individuo ubicado en cierto punto y que tiene que satisfacer una necesidad.

La accesibilidad es medida considerando diversos elementos e indicadores. Algunos trabajos actuales como el de Liu [22] que trata acerca de la accesibilidad de los ciudadanos a los parques, en éste se mide la accesibilidad mediante factores como la cantidad de parques en cierto radio determinado, el tiempo en llegar caminando al parque y el número de vueltas para llegar al parque por el camino más corto. En Sánchez-García et al. [32] se propone un método para determinar la ubicación de centrales eléctricas considerando la disponibilidad de la materia prima, tanto por su ubicación geográfica como por su accesibilidad. En dicho trabajo se consideran como indicadores de accesibilidad la distancia de la materia prima a las carreteras principales, los niveles de accesibilidad para el traslado de la materia prima considerando la pendiente del terreno, las redes de carreteras, los centros de población, las restricciones de gobierno y áreas protegidas.

Según Ibarra-Rojas et al. [19] ante las situaciones de emergencia no es suficiente considerar sólo el total de demanda cubierta por las instalaciones abiertas o la distancia de las zonas afectadas hacia las mismas, por esta razón en su trabajo acerca del problema de ruteo de vehículos presentan una medida de accesibilidad basada en seis indicadores: el número de zonas con acceso a las oportunidades con la movilidad delimitada, el número de zonas cubiertas, el costo del viaje, la distancia hacia la oportunidad más cercana, el número de oportunidades, y la disgregación geográfica.

En cuanto a la cobertura existen diferentes enfoques al respecto, por ejemplo en Toregas et al. [36] presentan un radio de cobertura considerando una distancia de servicio aceptable y además optimiza otros criterios de cobertura como minimizar el costo de las instalaciones que satisfagan toda la demanda, mientras que Church y ReVelle [12] maximizan la cantidad de demanda cubierta con cierto número limitado de instalaciones.

2.4 ALGORITMOS APROXIMADOS

Para tratar problemas complejos que no pueden ser resueltos mediante métodos exactos en un tiempo computacional razonable, se utilizan los algoritmos aproximados.

Según Talbi [34], dentro de los métodos aproximados se encuentran dos tipos de algoritmos:

- Algoritmos de aproximación: Estos algoritmos proporcionan una calidad de solución demostrable en un límite de tiempo de ejecución demostrable.
- Algoritmos heurísticos: Estos algoritmos encuentran soluciones «buenas» en un tiempo razonable para problemas de gran tamaño.

2.4.1 ALGORITMOS HEURÍSTICOS

A diferencia de los métodos exactos los cuales proporcionan la solución óptima de un problema, los métodos heurísticos proporcionan una solución buena en un tiempo razonable, pero que no necesariamente es la solución óptima.[25]

Díaz [14] define un método heurístico como: «Un procedimiento para resolver un problema de optimización bien definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución».

Los algoritmos heurísticos se clasifican en:

- Heurística específica: Es un algoritmo diseñado para resolver un problema y/o una estancia en específico.
- Metaheurística: Es un algoritmo diseñado para resolver diversos problemas de optimización.

2.4.1.1 METAHEURÍSTICAS

Cuando se diseña una metaheurística, puede ser vista de dos maneras: mediante la exploración del espacio de búsqueda (diversificación) o la explotación de las mejores soluciones encontradas (intensificación). En la diversificación se analizan las regiones que aún no se exploran con la finalidad de que todas las regiones se exploren de manera uniforme, mientras que la intensificación las regiones prometedoras (con soluciones «buenas» obtenidas) se analizan más a fondo para tratar de encontrar mejores soluciones. [34]

Según Talbi [34], las metaheurísticas suelen clasificarse de la siguiente manera:

- Inspirada en la naturaleza o no inspirada en la naturaleza: Muchas heurísticas

están inspiradas en procesos de la naturaleza como, por ejemplo: algoritmos evolutivos, colonias de abejas, las hormigas, recocido simulado, etc.

- Uso de memoria o sin memoria: Algunas metaheurísticas utilizan una memoria para almacenar información extraída durante la búsqueda (por ejemplo, recuerdos a corto y largo plazo en la búsqueda tabú), mientras que otros no utilizan información extraída dinámicamente en la búsqueda (por ejemplo, GRASP y recocido simulado).
- Determinista o estocástico: En las deterministas se toman como su nombre lo indica decisiones deterministas (por ejemplo, búsqueda tabú y búsqueda local), en éstas la misma solución inicial conduce a la misma solución final. Mientras que en las estocásticas se aplican reglas al azar durante la búsqueda (por ejemplo, recocido simulado y algoritmos evolutivos), en éstas se pueden obtener distintas soluciones finales a partir de la misma solución inicial.
- Búsqueda basada en población y búsqueda basada en una solución única: Las basadas en población se enfocan en explorar el espacio de búsqueda (por ejemplo, enjambre de partículas y algoritmos evolutivos) y las de búsqueda basados en una solución única tienen el objetivo de intensificar la búsqueda en las regiones locales (por ejemplo, búsqueda local y recocido simulado).
- Iterativo y codicioso: Los algoritmos iterativos inician con una solución completa o una población de soluciones que se transforma en cada iteración. Mientras que los codiciosos inician con una solución vacía hasta que se obtiene una solución completa.

2.4.2 APLICACIÓN DE HEURÍSTICOS

Cuando se trata de logística de emergencia, es importante actuar de una manera rápida, eficaz y efectiva, por lo que se requiere contar con un plan de acción poco tiempo después de que suceda el desastre.

El problema de localización de instalaciones aplicado en los casos reales requiere del procesamiento de instancias muy grandes, por lo que la mayoría de las veces se vuelve intratable resolverlo en un tiempo razonable mediante los modelos matemáticos. En estos casos para obtener una solución buena en un tiempo razonable, se utilizan los heurísticos.

En la literatura existen trabajos sobre logística humanitaria que utilizan heurísticos para obtener soluciones buenas rápidas, por ejemplo, Morales y Palacios [26] en 2017 proponen un heurístico con la finalidad de resolver el problema de localización y asignación en caso de inundación de manera que se minimizen los tiempos de traslado desde los puntos de demanda hasta los albergues dispuestos. También Cornejo et al. [13] en 2013 proponen una heurística para determinar la ubicación estratégica de los almacenes de logística humanitaria para damnificados en Perú.

Como pudimos ver a lo largo de este capítulo, el problema de localización de instalaciones para casos muy grandes puede volverse intratable mediante enfoques de optimización en un tiempo computacional razonable. Debido a que cuando se presenta un desastre se requiere actuar con rapidez, es recomendable solucionar el problema mediante la utilización de métodos heurísticos para obtener una solución suficientemente «buena» en un tiempo menor.

CAPÍTULO 3

FORMULACIÓN PROPUESTA

En este capítulo se presenta la formulación matemática para el problema de localización de instalaciones de respuesta a situaciones de emergencia considerando indicadores de accesibilidad. Se incluyen los supuestos considerados en la formulación matemática, así como los conjuntos, variables y parámetros del modelo, además de la explicación de la función objetivo y las restricciones consideradas.

Se optimiza una medida de accesibilidad para personas afectadas por un desastre que deben desplazarse en busca de ayuda.

En otros trabajos como en el de Liu [22] la accesibilidad se mide considerando indicadores como la cantidad de instalaciones existentes en un radio determinado, el tiempo que se requiere para llegar una instalación caminando y el número de vueltas requeridas para llegar a la instalación por el camino más corto.

En el presente trabajo se considerará la medida de accesibilidad propuesta por Ibarra-Rojas et al. [19] con algunas modificaciones para tratar este problema en particular.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Dado un conjunto de puntos que demandan ayuda humanitaria, determinar la localización de las instalaciones de respuesta. Los supuestos que se manejan para la definición del problema son:

- Se conoce la oferta límite de cada instalación, ya que la ayuda es limitada.
- Se conoce la demanda en cada punto afectado.
- Se conoce el número de instalaciones de ayuda que se pueden abrir.

También se considera que cada una de las instalaciones tiene dos radios diferentes: uno de cobertura y el otro es el radio de movilidad, es decir, la distancia que las personas de un punto pueden recorrer para llegar a una instalación de ayuda.

Como se muestra en la Figura 3.1, la instalación 1 cubre a los puntos de demanda 2 y 3, mientras que la instalación 3 cubre los puntos 3 y 4. Además, podemos observar que el punto de demanda 1 tiene la posibilidad de acercarse a la instalación 1 debido a que está dentro de su radio de movilidad.

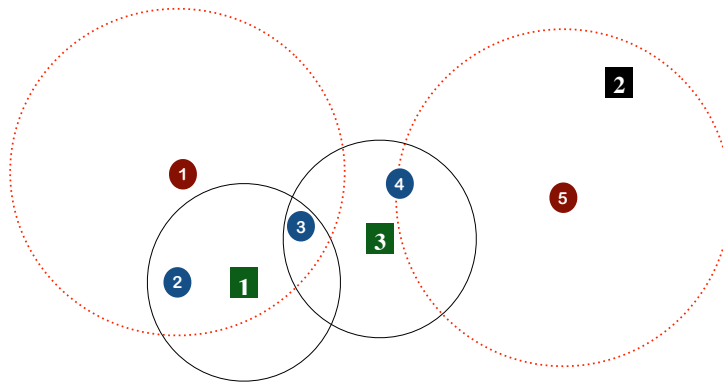


Figura 3.1: Ejemplo de ubicación de dos instalaciones entre 3 ubicaciones potenciales (indicadas con cuadrados) y 5 puntos de demanda (indicadas con círculos).

3.2 MEDIDA DE ACCESIBILIDAD

Suponiendo un conjunto dado de ubicaciones potenciales para que se abran n instalaciones. Siendo J el conjunto de puntos de demanda. Además, $N(i)$ representa el área de servicio de i , es decir, el conjunto de puntos de demanda cubiertos si una instalación está ubicada en el punto i , mientras que $A(j)$ es el conjunto de instalaciones dentro del radio de movilidad de cada punto de demanda $j \in J$. Además, decimos que un punto de demanda j tiene oportunidad en una instalación abierta $i \in I$ si $i \in A(j)$. Entonces, si tenemos n instalaciones abiertas, implícitamente definimos los conjuntos $I_1 \subset I$ y $I_2 \subset I$ de instalaciones abiertas y cerradas, respectivamente. De manera similar, existen $J_1 \subset J$ y $J_2 \subset J$ de puntos de demanda cubiertos y no cubiertos por el área de servicio de dichas instalaciones I_1 , respectivamente. Además, existen d_j que representa la demanda de la zona $j \in J$ y c_i que representa la capacidad de la instalación en la ubicación $i \in I$.

Con base en lo anterior, la medida de accesibilidad propuesta por Ibarra-Rojas et al. [19] integra los siguientes indicadores basados en la cobertura de puntos de demanda y cantidad/ubicación de oportunidades.

$$aa_j = \begin{cases} 1 & \text{si } j \in J_1 \text{ o hay una instalación } i \in A(j) \cap I_1 \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$ac = |J_1| \quad (3.2)$$

$$at_j = \begin{cases} 1 & \text{si } j \in J_1 \\ \frac{\sum_{i \in A(j)} \frac{x_{ij}}{t_{ij}}}{\frac{1}{\min_{i \in A(j)} t_{ij}}} & \text{si } j \in J_2 \end{cases} \quad (3.3)$$

$$an_j = \begin{cases} 0 & \text{si } j \in J_1 \\ \min t_{ij} i \in I_1 & \text{si } j \in J_2 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$as = \sum_{j: aa_j=0} \sum_{j': aa_{j'}=0} t_{jj'} \quad (3.5)$$

$$ae_i : \text{mínimo porcentaje de demanda asignada entre las zonas } j \text{ asignadas a } i \quad (3.6)$$

Observe que el indicador aa_j toma el valor de 1 si la zona tiene acceso para obtener un servicio, y 0 de lo contrario. El indicador ac es la cantidad de puntos cubiertos por el área de servicio de las instalaciones abiertas. Para definir el indicador de accesibilidad en at_j basado en la impedancia de viaje, utilizamos una función de costo de viaje desde el punto j hasta la instalación i definida como $f(t_{ij}) = \frac{1}{t_{ij}}$ ya que una forma común de medir dicho costo es como una potencia inversa del tiempo de viaje de una zona a otra [23]. Observe que al maximizar en at_j , se asignarán oportunidades más cercanas de j si j no está cubierto. Además de la impedancia de viaje, an_j representa el tiempo de viaje desde el punto j no cubierto hasta la instalación abierta más cercana. Finalmente, definimos un indicador a partir de la desagregación espacial, en la cual se suma la distancia entre j y j' cuando ambos puntos no están cubiertos. Maximizamos este último indicador para evitar una situación en la que los puntos de demanda no cubiertos estén cerca unos de otros. Nuestra medida de accesibilidad $A(J_1, J_2)$ para los conjuntos J_1 y J_2 se define como la siguiente suma ponderada de los indicadores de accesibilidad, cuyos parámetros representan las ponderaciones α_k .

$$A(J_1, J_2) = \alpha_1 \sum_{j \in J} aa_j + \alpha_2 ac + \alpha_3 \sum_{j \in J} at_j + \alpha_4 \sum_{j \in J} an_j + \alpha_5 as + \alpha_6 \sum_{i \in I} ae_i \quad (3.7)$$

En base a lo anterior, nuestro problema de ubicación de las instalaciones que maximiza los indicadores de accesibilidad determina las n instalaciones que se abrirán entre el conjunto I de ubicaciones potenciales de manera que la medida de accesibilidad $A(J_1, J_2)$ se base en la cobertura y el número/ubicación de oportunidades, y la desagregación espacial se maximice. A continuación, detallamos la formulación matemática propuesta.

3.3 FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Para definir la formulación matemática para el Problema de ubicación de instalaciones que maximiza los indicadores de accesibilidad, definimos las siguientes variables.

$$z_i = \begin{cases} 1 & \text{si la instalación } i \text{ está abierta} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{si la zona } j \text{ está cubierta por una instalación abierta } i \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$v_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la zona } j \text{ no está cubierta e } i \text{ es la instalación abierta más cercana, con } z_i = 1 \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la instalación } i \text{ está abierta y las personas en } j \text{ satisfacen demanda en } i \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$u_{jj'} = \begin{cases} 1 & \text{si la zona } j \text{ y } j' \text{ no tienen acceso} \\ 0 & \text{si al menos una zona tiene acceso} \end{cases}$$

w_{ij} : cantidad de producto que se otorga de la instalación i a la zona j

Entonces, nuestro programa lineal entero es el siguiente, en el que los parámetros definen las ponderaciones de los indicadores de accesibilidad.

$$\text{máx} \sum_{j \in J} \alpha_1 a a_j + \alpha_2 y_j + \alpha_3 a t_j + \alpha_4 a n_j + \alpha_5 a s + \alpha_6 \sum_{i \in I} a e_i \quad (3.8)$$

sujeto a:

$$\sum_{i \in I} z_i = n \quad (3.9)$$

$$x_{ij} \leq z_i \quad \forall j, i \in A(j) \quad (3.10)$$

$$\sum_{i \in A(j)} x_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (3.11)$$

$$t_{ij} \leq t_{i'j} + M_3(3 - x_{ij} - z_i - z_{i'}) \quad \forall j, i \in A(j), i' \in A(j) \quad (3.12)$$

$$x_{ij} \leq w_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.13)$$

$$w_{ij} \leq \min(d_j, c_i)x_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.14)$$

$$\sum_{j \in J} w_{ij} \leq c_i z_i \quad \forall i \in I \quad (3.15)$$

$$y_j \leq \sum_{i: j \in N(i)} z_i \quad \forall j \in J \quad (3.16)$$

$$y_j \leq \sum_{i: j \in N(i)} w_{ij} \quad \forall j \in J \quad (3.17)$$

$$aa_j \leq y_j + \sum_{i \in A(j)} w_{ij} \quad \forall j \in J \quad (3.18)$$

$$at_j \leq \frac{\sum_{i \in A(j)} \frac{x_{ij}}{t_{ij}}}{\frac{1}{\min_{i \in A(j)} t_{ij}}} + y_j \quad \forall j \in J \quad (3.19)$$

$$v_{ij} \leq z_i \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.20)$$

$$\sum_{i \in I} v_{ij} = (1 - aa_j) \quad \forall j \in J \quad (3.21)$$

$$an_j = \sum_{i \in I} v_{ij} t_{ij} \quad \forall j \in J \quad (3.22)$$

$$ae_i \leq z_i \quad \forall i \in I \quad (3.23)$$

$$ae_i \leq \frac{w_{ij}}{d_j} + M_5(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.24)$$

$$u_{jj'} \leq 1 - aa_j \quad \forall j, j' \in J \quad (3.25)$$

$$u_{jj'} \leq 1 - aa_{j'} \quad \forall j, j' \in J \quad (3.26)$$

$$1 \leq u_{jj'} + aa_j + aa_{j'} \quad \forall j, j' \in J \quad (3.27)$$

$$as = \sum_{j \in J} \sum_{j' \in J-j} u_{jj'} t_{jj'} \quad (3.28)$$

La función objetivo (3.8) representa nuestra medida de accesibilidad. La restricción (3.9) limita el número de instalaciones abiertas. La restricción (3.10) se asegura de que la demanda de una zona j puede ser satisfecha solamente en una instalación i abierta. La ecuación (3.11) se asegura de que las personas de una zona j pueden buscar satisfacer su demanda a lo más en una instalación i dentro de su radio de movilidad. La restricción (3.12) modela el comportamiento de las personas donde se asume que se acercan a su oportunidad más cercana. Las restricciones (3.13) y (3.14) se aseguran que x_{ij} sea 1, solamente cuando recibe producto de i . La restricción (3.15) se asegura que la cantidad de producto entregado no exceda la capacidad de i . La desigualdad (3.16) obliga a la variable y_j a ser 0 cuando la zona j no tiene instalaciones i abiertas dentro de su radio de cobertura. La restricción (3.17) se asegura que y_j sea 0 cuando no recibe producto de la instalación i . La ecuación (3.18) garantiza que aa_j toma el valor de 1 si la zona está cubierta ($y_j = 1$) o tiene al menos una oportunidad i dentro de su radio de movilidad $A(j)$, y 0 en caso contrario. La desigualdad (3.19) y la función objetivo (3.8) definen el valor del indicador at_j . Las restricciones (3.20) y (3.21) garantizan que cada zona j no cubierta tiene solo una oportunidad más cercana i . La ecuación (3.22) define las variables an_j . La ecuación (3.23) se asegura que el indicador ae_i solo pueda obtener valor cuando la instalación éste abierta. La ecuación (3.24) sirve para indicar el porcentaje de demanda cubierto por una instalación en i . Las restricciones (3.25), (3.26) y (3.27) se aseguran de que la variable $u_{jj'}$ sea 0 cuando j o j' tengan acceso y 1 cuando ambos puntos no tengan acceso a oportunidades. Finalmente, la ecuación (3.28) define la suma de las distancias entre los puntos sin acceso a oportunidades.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DE LA FORMULACIÓN MATEMÁTICA

En este capítulo se incluyen el diseño de la experimentación realizada en cuatro tamaño de instancias.

Además, se incluyen los resultados obtenidos mediante la experimentación en CPLEX de la formulación matemática propuesta en el capítulo anterior.

4.1 DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN

Se diseñaron diferentes tipos de instancias en función del número de ubicaciones $|I|$, el número de instalaciones que se abrirán n , los puntos de demanda $|J|$, un tamaño de cuadrícula para las coordenadas generadas aleatoriamente de todos los puntos, y el radio de cobertura (r_C) y la movilidad (r_A). Además, se consideró una capacidad de las instalaciones aleatoria entre 50 y 500 y una demanda de los puntos aleatoria entre 10 y 100. La Tabla 4.1 muestra los diferentes tipos de instancias y para cada tipo, generamos aleatoriamente 30 instancias. Los parámetros de peso se fijan de la siguiente manera $\alpha_1 = 1000$, $\alpha_2 = 250$, $\alpha_3 = 100$, $\alpha_4 = -1$, $\alpha_5 = 10$ y $\alpha_6 = 100$ (según lo propuesto por Ibarra-Rojas et al.[19]).

Tabla 4.1: Tipos de instancias para el problema de localización de instalaciones.

Tipo de instancia	Tamaño de						Capacidad	Demanda
	$ I $	n	$ J $	r_C	r_A	cuadrícula		
A	40	8	120	10	20	100 × 100	50-500	10-100
B	80	16	250	10	20	130 × 130	50-500	10-100
C	200	20	600	10	20	150 × 150	50-500	10-100

4.2 RESULTADOS EN CPLEX

Todos los experimentos se realizaron en una MacPro con 6 GHz de 6 núcleos Intel Xeon E5, 16 GB de RAM y utilizando la versión 12.7 del solucionador CPLEX. Los resultados numéricos se muestran en la Tabla 4.2 donde cada fila exhibe el gap relativo promedio ¹ (“gap”) y el tiempo promedio de ejecución en segundos (“tiempo”), mientras que las columnas denotan los diferentes tipos de instancias.

Tabla 4.2: Resultados numéricos de resolver las instancias generadas aleatoriamente utilizando el solucionador de CPLEX.

	Instancias A	Instancias B	Instancias C
gap	0.000381 %	0.000525 %	NA
tiempo	39.49	248.74	3600

Como podemos observar en la Tabla 4.2, para los casos A y B se logró obtener la solución óptima en un tiempo razonable, pero para el caso tipo C no se logró obtener una solución factible en el tiempo máximo de ejecución asignado de 3600 segundos.

¹El gap o la brecha relativa se calcula como $\frac{|mejorlimite - mejorentero|}{|mejorlimite|} 100\%$, donde *mejorlimite* y *mejorentero* son el mejor límite dual del árbol Branch-and-cut y el objetivo de la mejor solución posible, respectivamente.

4.2.1 RESULTADO DE INSTANCIA TIPO A

En la Tabla 4.3 y la Figura 4.1 se muestra el resultado obtenido de una instancia tamaño A. Donde los cuadrados verdes representan las instalaciones abiertas, los cuadrados negros las instalaciones cerradas, los círculos lilas los puntos de demanda cubiertos, los puntos rosas los puntos de demanda que tienen movilidad hacia las instalaciones abiertas (las líneas rosas señalan hacia cuál instalación tienen acceso) y los puntos rojos los puntos de demanda no cubiertos.

Como podemos observar en la Tabla 4.3 para un ejemplo de un caso tipo A, se logró encontrar la solución óptima en un tiempo de 0.63 segundos.

Tabla 4.3: Resultado de la formulación matemática de una instancia A.

Instancia A	
gap	0 %
tiempo	47.82

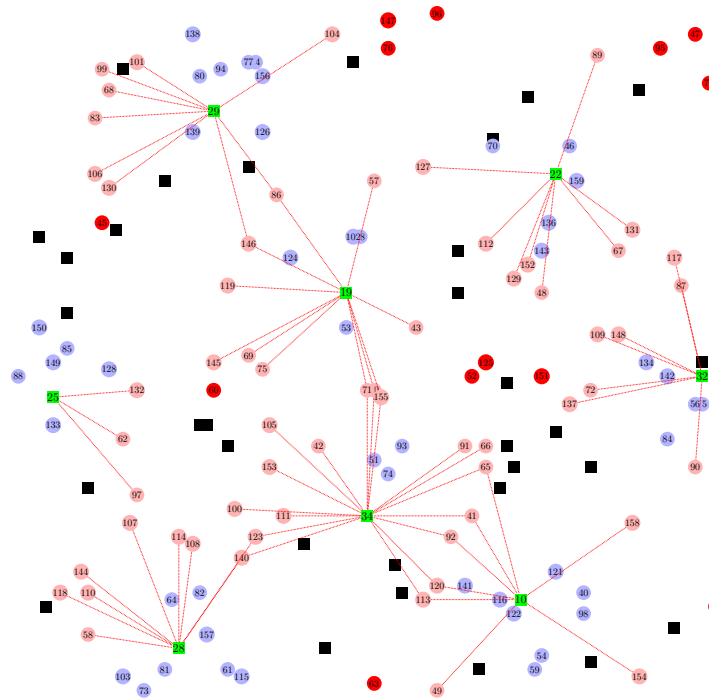


Figura 4.1: Resultado de la formulación matemática de una instancia A

4.2.2 RESULTADO DE INSTANCIA TIPO B

En la Tabla 4.4 y la Figura 4.2 se muestra el resultado obtenido de una instancia tamaño B. Como podemos observar en la Tabla 4.4 para un ejemplo de un caso tipo B, se logró encontrar la solución óptima en un tiempo de 13.47 segundos.

Tabla 4.4: Resultado de la formulación matemática de una instancia B.

Instancia B	
gap	0.07 %
tiempo	133.28

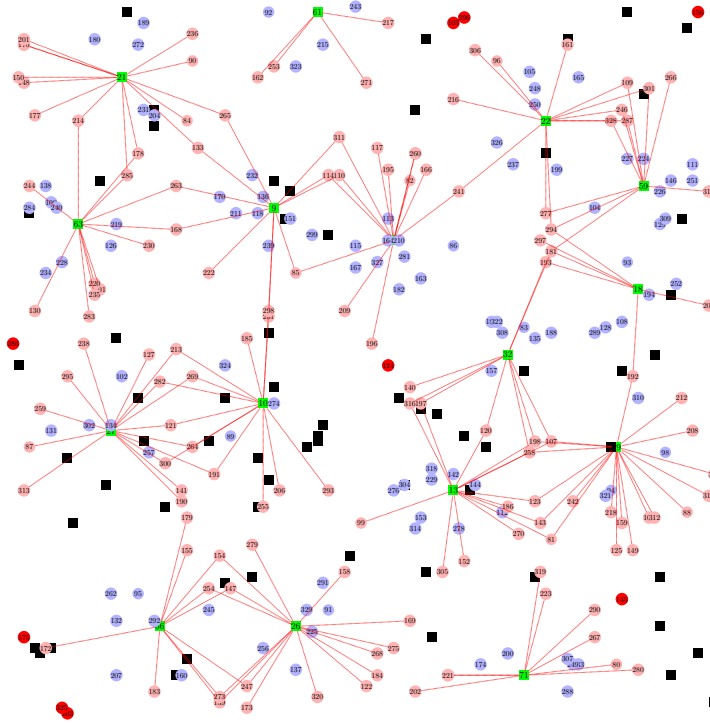


Figura 4.2: Resultado de la formulación matemática de una instancia B

Con la implementación en CPLEX de la formulación matemática, pudimos observar que para los tamaños A y B se encuentra la solución óptima dentro del tiempo máximo determinado de 3600 segundos, mientras que para el tamaño C no se logró obtener una solución factible en el límite de tiempo.

CAPÍTULO 5

MÉTODO HEURÍSTICO

Debido a que la implementación de la formulación matemática en el *solver* comercial no logró obtener una solución factible para instancias del tipo C en un tiempo computacional razonable, se propone solucionar el problema de localización de instalaciones de emergencia mediante la utilización de un método heurístico.

5.1 ALGORITMO CONSTRUCTIVO

Como primer paso para la creación del método heurístico se propone crear la solución inicial mediante un algoritmo constructivo formado por las siguientes fases:

Fase I. Apertura de instalaciones: En esta fase se suman las demandas de los puntos que pudiera cubrir cada instalación. Después, se ordenan de mayor a menor las instalaciones de acuerdo a su capacidad.

Posteriormente, se decide cuáles instalaciones serán abiertas, se abre una instalación a la vez hasta completar todas la posibles. Se revisan las instalaciones ordenadas de mayor capacidad hacia la menor. Si la instalación no ha sido abierta se abre si la demanda es mayor o igual a la capacidad. Sino se procede a verificar en el resto de las instalaciones si hay alguna que pueda ser mejor, el caso mejor es en el que tanto la demanda como la capacidad de la otra instalación sea mayor a la

demanda del actual; confirmándose que hay un caso mejor, se procede a verificar otras instalaciones, en caso de que no haya ninguna mejor, se abre la instalación que se está verificando.

Fase II. Asignación de la demanda: En esta fase se realiza la asignación de los recursos disponibles de la instalación entre los puntos que cubre, dicha asignación se realiza de la siguiente manera:

- Se empieza con las instalaciones abiertas en el orden en el que están en la matriz de selección de instalaciones.
- Si la demanda es menor a la capacidad se toma toda la demanda disponible de los puntos de demanda (que abarca dicha instalación).
- En caso de ser la demanda mayor se toman primero la demanda a cada punto de demanda proporcionalmente a la capacidad y la demanda total, después se asigna unidad por unidad de la capacidad restante hasta completarla.

Posteriormente, se realiza el cálculo de los cinco indicadores de accesibilidad: aa , ac , at , an y as .

En el Algoritmo 1 se presentan de manera detallada los pasos a seguir para obtener la solución inicial mediante el algoritmo constructivo, a partir de las dos fases: apertura de instalaciones y asignación de la demanda.

En el Algoritmo 1, j son los puntos de demanda, i son las ubicaciones potenciales de las instalaciones, n son la cantidad de instalaciones posibles a abrir, d_j es la demanda de los puntos j , c_i es la capacidad de las instalaciones i , $distancia_{ij}$ es la distancia entre los puntos j a las instalaciones i , $demand_a_i$ es la demanda acumulada posible de la instalación I , da_j es la demanda ya abarcada por instalaciones, ca_i es la capacidad consumida de la instalación y *proporcion* es la proporción entre la demanda posible y la capacidad de la instalación.

Algorithm 1: *Constructivo*

Fase I. Apertura de instalaciones:

Input j, i, n, d_j, c_i y $distancia_i$.

Para todo $i \in I$, calcular $demanda_i = \sum_{j:i \in A(j)} d_j$

ordenar I decrecientemente respecto a c_i ;

for ($k = 1; k = n$) **do**

for ($p = 1; p = |I|$) **do**

$i = I[p]$ (p-ésimo elemento en I);

if ($c_i < demanda_i$) **then**

$z_i = 1$;

break for ;

Fase II. Asignación de demanda:

for $i \in I$ tal que $z_i = 1$ **do**

if $demanda_i \leq c_i$ **then**

for $j \in J$ tal que $i \in A(j)$ **do**

$ca_i = ca_i + d_j - da_j$;

$da_j = d_j$;

if $demanda_i > c_i$ **then**

$proporcion = demanda_i / c_i$;

for $j \in J$ tal que $i \in A(j)$ **do**

$ca_i = ca_i + (proporcion * d_j)$;

$da_j = da_j + (proporcion * d_j)$;

for $j \in J$ tal que $i \in A(j)$ **do**

if $da_j < d_j$ **then**

if $ca_i \geq c_i$ **then**

break for;

else

$ca_i = ca_i + 1$;

$da_j = da_j + 1$;

5.2 BÚSQUEDA LOCAL

Es la búsqueda de una mejor solución partiendo de una solución inicial y mediante modificaciones de ésta se explora soluciones vecinas para encontrar mejoras. Dichas mejoras sirven de base para iniciar de nuevo la búsqueda hasta que no se encuentre una mejor. Utilizando como solución inicial la obtenida con el método constructivo de la sección anterior, se plantea la búsqueda local tipo 2-opt con dos variantes: primera mejor y mayor mejora. La búsqueda local tipo 2-opt se basa en la modificación de 2 variables a la vez como una solución vecina. En nuestro caso dichas variables representan la instalación abierta que se va a cerrar y cada una de las instalaciones que están cerradas, esto se hace para cada instalación abierta. El resto de las decisiones se realizan como en el constructivo descrito en el Algoritmo 1.

5.2.1 BÚSQUEDA LOCAL 2-OPT DE LA PRIMERA MEJORA

La búsqueda local 2-opt de la primera mejora, hace la búsqueda de las soluciones vecinas de la forma antes mencionada, tomando la primera solución que mejore la solución y con dicha solución vuelve a empezar la búsqueda, hasta que no

se encuentre otra mejor solución.

Algorithm 2: *BusquedaLocalPrimeramejora*

```

Input: solución factible  $s$ ;
 $mejore = true$ ;
while ( $mejore$ ) do
     $mejore = false$ ;
    for  $(i, j); z_i = 1, z_j = 0$  do
         $s' \leftarrow op(s, i, j)$ ;
        if ( $f(s') > f(s)$ ) then
             $s \leftarrow s'$ ;
             $mejore = true$ , break for

```

5.2.2 BÚSQUEDA LOCAL 2-OPT DE LA MAYOR MEJORA

La búsqueda local 2-opt de mayor mejora, hace la búsqueda de las soluciones vecinas de la forma antes mencionada, tomando la mejor solución de entre todas las opciones vecinas posibles y con dicha solución vuelve a empezar la búsqueda, hasta

que no se encuentre otra mejor solución.

Algorithm 3: *BusquedaLocalMayorMejora*

Input: solución factible s ;

$mejore = true$;

while ($mejore$) **do**

$mejore = false$;

$s_{best} \leftarrow s$;

for $(i, j): z_i = 1, z_j = 0$ **do**

$s' \leftarrow op(s, i, j)$;

if $(f(s') > f(s_{best}))$ **then**

$s_{best} \leftarrow s'$;

$mejore = true$;

$s \leftarrow s_{best}$;

CAPÍTULO 6

RESULTADOS DE MÉTODO HEURÍSTICO

En este capítulo se incluyen los resultados obtenidos mediante la implementación del método heurístico conformado por el algoritmo constructivo, la búsqueda local de la primera mejora y la búsqueda local de la mayor mejora que se propusieron en el capítulo anterior. Además, se realiza la comparación y análisis de los resultados obtenidos mediante la implementación en un *solver* con la formulación matemática.

Todos los experimentos se realizaron en una MacPro con 6 GHz de 6 núcleos Intel Xeon E5 y 16 GB de RAM. Se utilizaron las mismas instancias diseñadas desde el capítulo 4 que se muestran en la tabla 4.1 para posteriormente realizar la comparación entre los resultados obtenidos.

6.1 RESULTADO DE UNA INSTANCIA TIPO A, B Y C.

En esta sección, se presentan ejemplos de los resultados obtenidos para cada uno de los tamaños de instancias mediante la implementación del algoritmo constructivo, la búsqueda local de la primera mejora y la búsqueda local de la mayor mejora.

En la Tabla 6.1 y la Figura 6.1 se muestra el resultado obtenido mediante el algoritmo constructivo, la búsqueda local de la primera mejora, de la mayor mejora

y CPLEX de una instancia tamaño A. En la Figura 6.1 los cuadrados verdes representan las instalaciones abiertas, los cuadrados negros las instalaciones cerradas, los círculos lilas los puntos de demanda cubiertos, los puntos rosas los puntos de demanda que tienen movilidad hacia las instalaciones abiertas (las líneas rosas señalan hacia cuál instalación tienen acceso) y los puntos rojos los puntos de demanda no cubiertos.

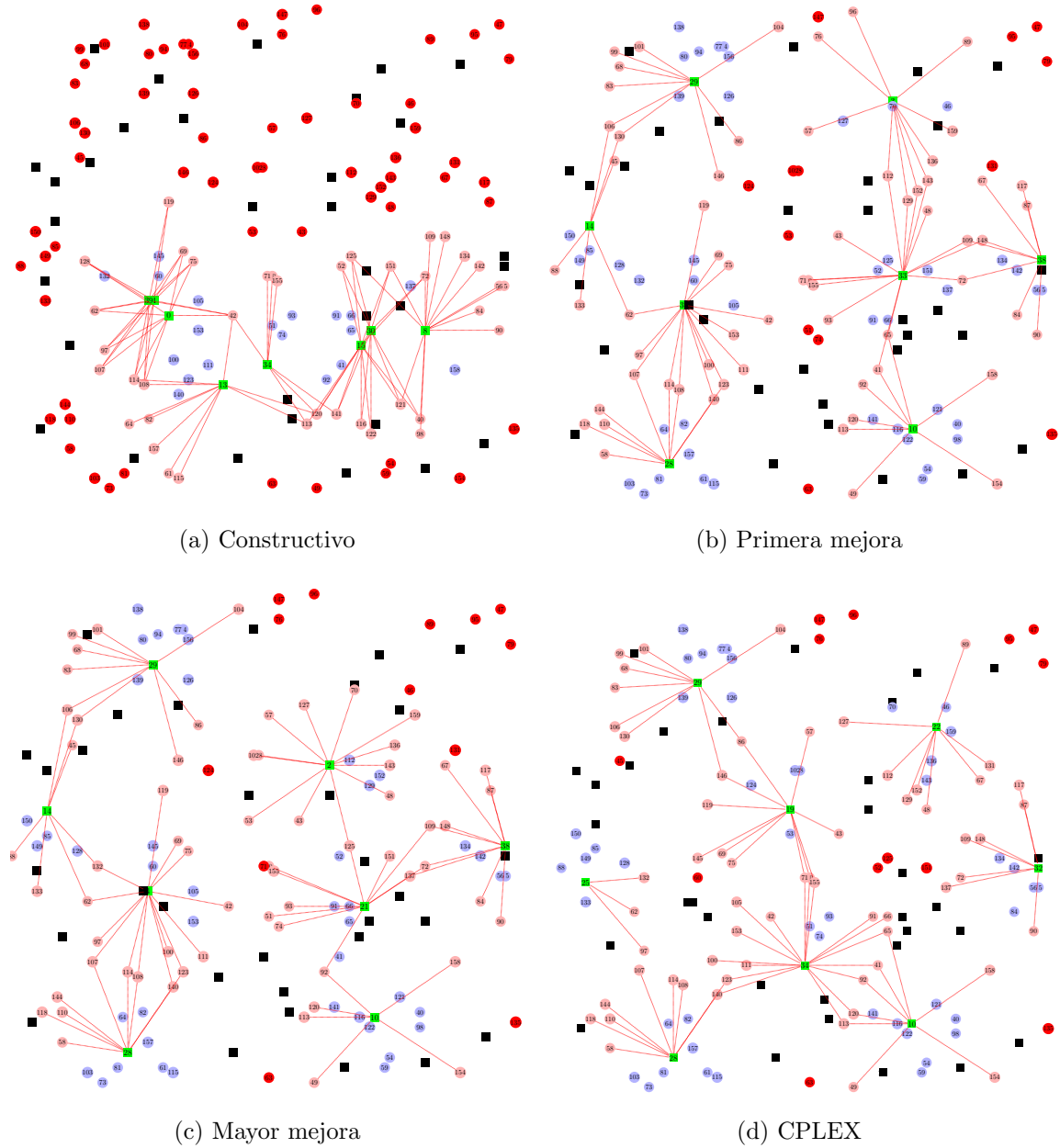


Figura 6.1: Resultados obtenidos para una instancia tipo A.

Tabla 6.1: Resultados obtenidos de una instancia tipo A.

Indicador	Algoritmo constructivo	Primera mejora	Mayor mejora	CPLEX
aa	57	107	107	107
ac	19	45	44	47
at	30.4446	57.8737	56.5289	59.2392
an	2384	322	383	318
ae	3.89138	1.42366	1.42291	1.50074
as	105835	3851	3737	4258
Función objetivo	63857.95	123896.25	123449.55	126625
Tiempo	0.008031	0.09954	0.257171	47.8292

Note que en la Figura 6.1 existe una mejora muy significativa de las búsquedas locales al algoritmo constructivo, ya que se observan la reducción de los puntos sin acceso (indicados en color rojo), lo cual señala una mejora en nuestra medida de accesibilidad.

En la Tabla 6.1 se puede observar que para este caso en particular la búsqueda local de la mayor mejora no ofrece ningún beneficio en comparación con la búsqueda local de la primera mejora, pero más adelante podremos observar que no en todos los casos es así. También podemos observar que con las búsquedas locales se obtienen resultados muy cercanos al óptimo en un tiempo mucho menor que con CPLEX.

En la Tabla 6.2 y la Figura 6.2 se muestra el resultado obtenido mediante el algoritmo constructivo, la búsqueda local de la primera mejora, de la mayor mejora y CPLEX de una instancia tamaño B.

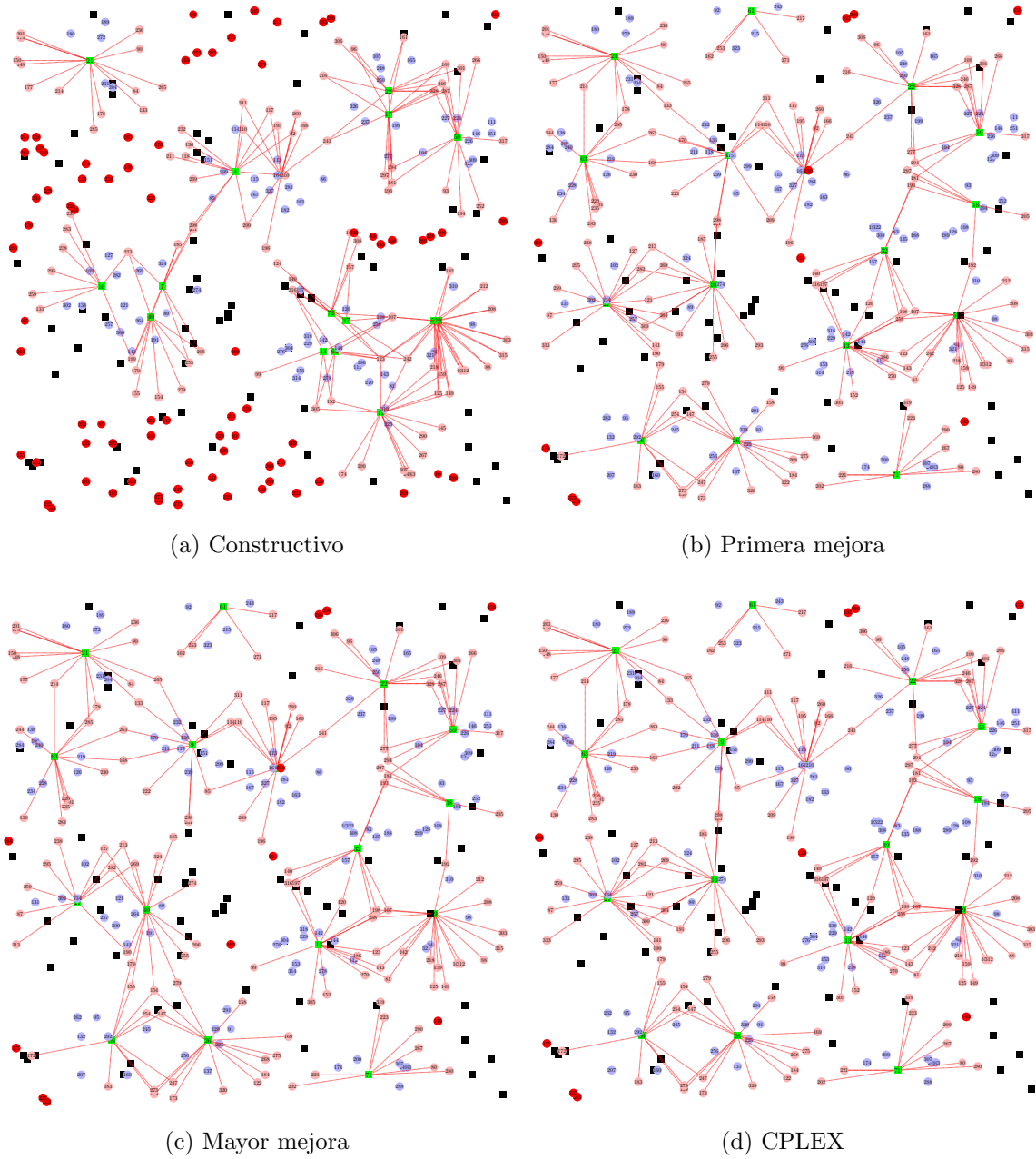


Figura 6.2: Resultados obtenidos para una instancia tipo B.

Tabla 6.2: Resultados obtenidos de una instancia tipo B.

Indicador	Algoritmo constructivo	Primera mejora	Mayor mejora	CPLEX
aa	173	241	240	241
ac	76	106	109	106
at	105.923	138.992	141.907	140.097
an	2356	214	236	214
ae	6.94262	3.54173	3.61544	3.09818
as	204370	3390	4014	3390
Función objetivo	202974.26	281573.27	281606.38	285982
Tiempo	0.026453	4.65617	4.746227	133.286

En la Tabla 6.2 se puede observar que existe una mayor cantidad de puntos con acceso (indicador *ac*), además que el costo de movilidad (indicador *at*) es mejor. También podemos observar que las búsquedas locales logran encontrar soluciones muy cercanas a la óptima en un tiempo mucho menor a CPLEX.

En la Tabla 6.3 y la Figura 6.3 se muestra el resultado obtenido mediante el algoritmo constructivo, la búsqueda local de la primera mejora y de la mayor mejora de una instancia tamaño C.



Figura 6.3: Resultados obtenidos para una instancia tipo C.

Tabla 6.3: Resultados obtenidos de una instancia tipo C.

Indicador	Algoritmo constructivo	Primera mejora	Mayor mejora
aa	267	568	573
ac	134	222	222
at	151.736	248.001	251.539
an	13743	836	671
ae	12.4508	3.45566	3.41294
as	4741000	48589	35811
Función objetivo	350585.68	648295.6	653682.3
Tiempo	0.146104	95.026	187.4729

En la Tabla 6.3 note como existen cinco puntos cubiertos más con la búsqueda local de la mayor mejora, que con la búsqueda local de la primera mejora. Además, también hay una diferencia muy significativa del indicador de segregación espacial (indicador *as*), lo cual indica que los puntos sin acceso se encuentran más dispersos. Note que en la Tabla 6.3 y la Figura 6.3 no se incluyen los resultados obtenidos mediante CPLEX, debido a que no se encontró una solución factible en el tiempo máximo asignado de una hora.

6.2 COMPARACIÓN DE LAS BÚSQUEDAS LOCALES RESPECTO AL ALGORITMO CONSTRUCTIVO

En esta sección se incluye la comparación y el análisis de los resultados obtenidos mediante CPLEX, el algoritmo constructivo, la búsqueda local de la primera mejora y la búsqueda local de la mayor mejora.

Con la información de los resultados obtenidos mediante la implementación método heurístico para cada instancia de los diferentes tamaños (mostrada en el

Apéndice B), en la Tabla 6.4 se realizó una comparación de los porcentajes mínimos, máximos y promedio de la mejora de la función objetivo que realizan los dos tipos de búsquedas locales en la solución inicial del algoritmo constructivo.

Tabla 6.4: Comparación de mejoras obtenidas de la función objetivo del algoritmo constructivo mediante las búsquedas locales.

Búsqueda local	Primera mejora			Mayor mejora		
Instancias	mínimo	máximo	promedio	mínimo	máximo	promedio
Tipo A	13.21 %	115.99 %	51.20 %	13.78 %	115.99 %	51.45 %
Tipo B	16.89 %	75.59 %	48.41 %	18.40 %	77.20 %	48.76 %
Tipo C	53.25 %	138.70 %	87.52 %	55.03 %	139.95 %	88.17 %

Posteriormente, se realizó una comparación del porcentaje de mejora de la función objetivo del algoritmo constructivo utilizando las búsquedas locales de la primera mejora y de la mayor mejora. En la Figura 6.4 se muestran las 30 instancias del tamaño A, en la Figura 6.5 se muestran las 30 instancias del tamaño B y en la Figura 6.6 se muestran las 30 instancias del tamaño C.

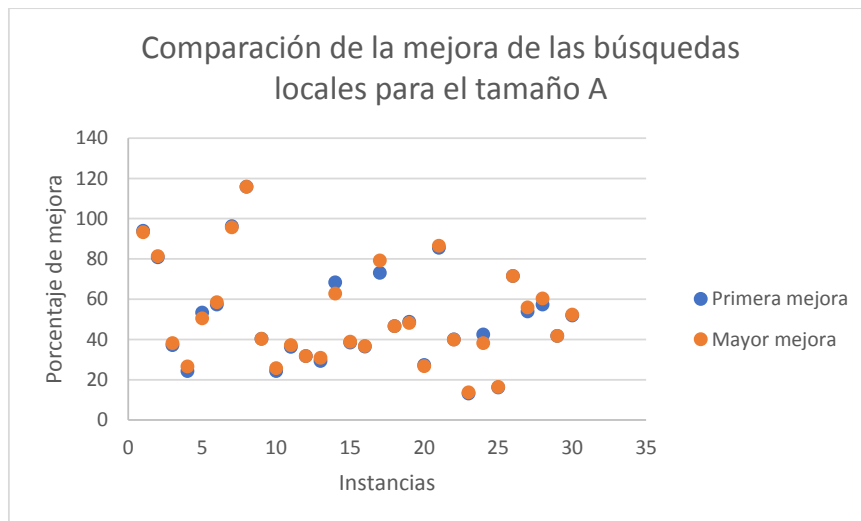


Figura 6.4: Comparación de mejoras del algoritmo constructivo mediante las búsquedas locales en las instancias A

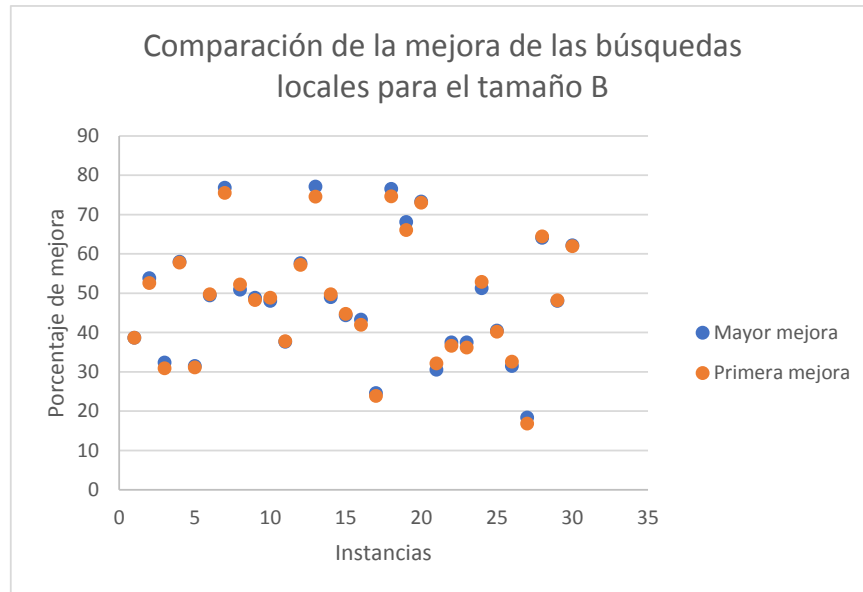


Figura 6.5: Comparación de mejoras del algoritmo constructivo mediante las búsquedas locales en las instancias B

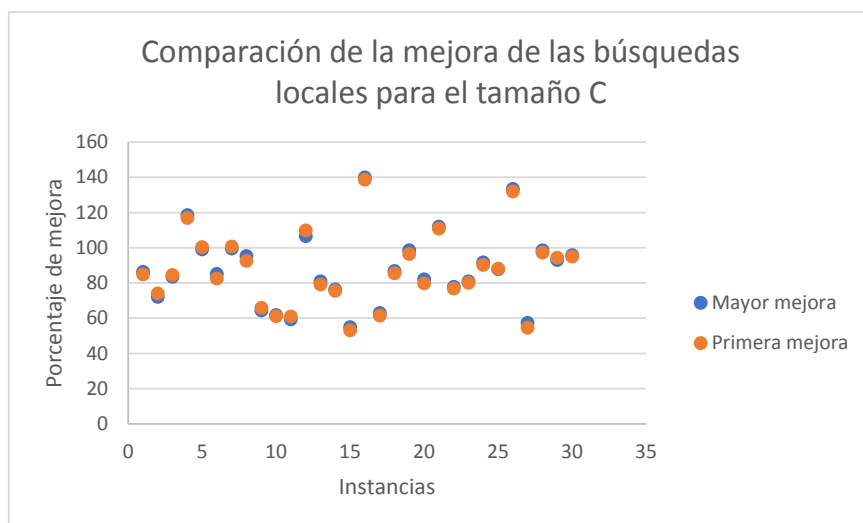


Figura 6.6: Comparación de mejoras del algoritmo constructivo mediante las búsquedas locales en las instancias C

Con este análisis podemos observar que la búsqueda local de la mayor mejora obtiene en promedio mejores resultados que la búsqueda local de la primera mejora.

Para las instancias A la búsqueda local de la mayor mejora obtiene mejores resultados para el 73.33 % de los casos. Mientras que para las instancias B la búsqueda local de la mayor mejora obtiene mejores resultados en el 63.33 % de los casos. Finalmente, para las instancias C la búsqueda local de la mayor mejora obtiene mejores resultados en el 70 % de los casos. Además, se puede observar que las búsquedas locales realizan un porcentaje de mejora mayor para las instancias tipo C.

6.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE CPLEX Y LAS BÚSQUEDAS LOCALES

En la Tabla 6.5 se realiza la comparación del promedio y desviación estándar del gap y tiempo obtenido mediante CPLEX y las búsquedas locales de la primera mejora y la mayor mejora.

Tabla 6.5: Comparación del gap y tiempo obtenido por cada metodología.

	Tipo de Instancia	Instancia A	Instancia B
CPLEX	Promedio gap	0.00038112 %	0.000525024 %
	Desviación estándar gap	0.00027291	0.000303673
	Promedio tiempo	39.4987367	248.7438667
	Desviación estándar tiempo	23.5077337	159.8590188
Búsqueda local mayor mejora	Promedio gap	2.2901733 %	2.186835832 %
	Desviación estándar gap	1.0574655	0.465193837
	Promedio tiempo	0.180156	5.319234
	Desviación estándar tiempo	0.038404	1.092144707
Búsqueda local primera mejora	Promedio gap	2.46302149 %	2.402309592 %
	Desviación estándar gap	0.98615362	0.477649181
	Promedio tiempo	0.119914	3.122751
	Desviación estándar tiempo	0.037969	1.080975446

Como podemos observar en la Tabla 6.5 con el método heurístico se encuentran soluciones muy buenas con un gap promedio de alrededor del 2 % en un tiempo mucho

menor que al implementar un *solver* con la formulación matemática.

Note que la Tabla 6.5 no se incluye la columna de instancias C, debido a que el *solver* comercial no pudo encontrar una solución factible para este tamaño de instancias, en el tiempo estimado de 3600 segundos. Mientras que el método heurístico obtiene una solución factible para este tamaño de instancias en promedio en 92 segundos usando la búsqueda local de la primera mejora y en 162 segundos en promedio utilizando la búsqueda de la mayor mejora.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones encontradas con la implementación de la formulación matemática y el método heurístico para el problema de localización de instalaciones de emergencia, así como el trabajo a futuro.

7.1 CONCLUSIONES

Como pudimos observar en el Capítulo 2 debido a la complejidad para resolver el problema de localización de instalaciones, el método más utilizado para resolverlo es mediante la utilización de técnicas heurísticas.

Como primera etapa de nuestra metodología se propone resolver el problema de localización de instalaciones de emergencia mediante un enfoque de optimización, utilizando una formulación matemática. Con la implementación de esta formulación matemática para los tres tamaños de instancias propuestos, asignando un tiempo máximo de ejecución de 3600 segundos, pudimos concluir que para los tamaños A y B se logra encontrar la solución óptima dentro del tiempo establecido, pero para el tamaño C no se logra encontrar una solución factible dentro del límite de tiempo asignado.

Es importante mencionar que cuando se trata de localización de instalacio-

nes de emergencia el objetivo es la optimización del tiempo de respuesta y de la accesibilidad. Por esta razón se vuelve de suma importancia el tiempo que tardará la herramienta en generar la solución, por lo cual en este trabajo se propone la utilización de un método heurístico para solucionar el problema.

El método heurístico propuesto está conformado por un algoritmo constructivo, una búsqueda local de la primera mejora y una búsqueda local de la mayor mejora. Mediante la implementación del método heurístico pudimos observar que con este método se obtienen soluciones muy buenas para los tamaños de instancias A y B en un tiempo mucho menor que con la formulación matemática. Además, con la implementación del método heurístico si logramos encontrar soluciones factibles para el tamaño de instancias C en tan sólo un par de minutos, cuando con la formulación matemática no se obtiene ninguna solución factible en una hora.

El algoritmo constructivo genera una solución basada en la cobertura de los puntos de demanda por las instalaciones, este principio de cobertura es utilizado en la mayoría de los trabajos relacionados consultados. Sin embargo, en nuestro trabajo adaptamos para nuestro problema en particular, la medida de accesibilidad propuesta por Ibarra-Rojas et al. [19], la cual está conformada por un conjunto de indicadores como: aa_j que indica la cantidad de puntos de demanda con acceso, ac que indica la cantidad de puntos cubiertos, at_j que representa la impedancia de viaje, an_j que representa la distancia entre los puntos no cubiertos hacia la instalación abierta más cercana, as que representa la suma de las distancias entre los puntos no cubiertos y ae_i es el mínimo porcentaje de demanda cubierto por una instalación entre los puntos de demanda asignados a ella.

En nuestro trabajo, se realizó una comparación entre el porcentaje que mejoran las dos búsquedas locales a la función objetivo de la solución generada por el algoritmo constructivo. Ahí se pudo observar que en promedio se obtiene una mayor mejora con la búsqueda local de la mayor mejora. Con este análisis podemos observar gráficamente y numéricamente como la medida de accesibilidad propuesta ubica de

una mejor manera las instalaciones de emergencia, de manera que las personas de los puntos de demanda podrán acceder más fácilmente a la instalación abierta más cercana.

Además, con la comparación realizada entre las soluciones obtenidas con la formulación matemática y el método heurístico, podemos concluir que el método heurístico si logra obtener soluciones factibles para el tamaño de instancias C, lo cual no fue posible por medio de la utilización de la formulación matemática. Mientras que para el tamaño de instancias A y B se obtienen soluciones muy buenas con el método heurístico en un tiempo mucho menor que lo que tarda la formulación matemática en encontrar la solución óptima.

7.2 TRABAJO A FUTURO

En este trabajo se realiza una aplicación del problema de localización de instalaciones para el caso de la logística humanitaria. Sin embargo, este trabajo puede ser adaptado para otro tipo de actividades como la localización de almacenes, fábricas o tiendas.

Además, en este trabajo se consideran solamente aspectos de accesibilidad, pero también podrían incluirse los costos de las instalaciones como parte de una restricción o de la función objetivo.

Finalmente, se podría implementar nuestra herramienta en algún caso de estudio real para poder realizar un mejor análisis de las soluciones generadas por los diferentes métodos: formulación matemática, algoritmo constructivo, búsqueda local de la primera mejora y búsqueda local de la mayor mejora. Además, podrían realizarse mejoras al método heurístico para mejorar la soluciones generadas por él.

APÉNDICE A

RESULTADOS DE LA FORMULACIÓN MATEMÁTICA

En este apéndice se muestran las tablas de resultados completas que se obtuvieron mediante la formulación matemática para las diferentes 30 instancias probadas del tamaño A y B. En cada tabla, se detalla el valor de cada indicador obtenido, así como el valor de la función objetivo encontrada.

A.1 RESULTADOS DE INSTANCIAS TIPO A

En esta sección se muestran los resultados obtenidos por la formulación matemática.

Tabla A.1: Resultados obtenidos por la formulación matemática para instancias A.

Instancia	Cota dual	Cota primal	GAP	aa	ac	at	an	as	ae	Función objetivo	Tiempo
AFLP40_120_1.txt	126717	126625	0 %	107	47	59.2392	318	4258	1.50074	126625	47.8292
AFLP40_120_2.txt	125090	125028	0 %	107	41	57.4457	349	4920	1.44175	125028	88.6874
AFLP40_120_3.txt	122991	122978	0 %	104	45	60.9459	392	6627	1.57305	122978	67.0651
AFLP40_120_4.txt	126126	126053	0 %	108	42	55.6533	301	3661	1.04149	126053	39.7601
AFLP40_120_5.txt	125935	125906	0 %	107	44	60.4264	316	3393	1.40362	125906	14.473
AFLP40_120_6.txt	126205	126188	0 %	111	31	48.5353	221	1970	1.47243	126188	37.8586
AFLP40_120_7.txt	130509	130434	0 %	111	45	60.9505	222	2322	1.08883	130434	14.9875
AFLP40_120_8.txt	128117	128048	0.05 %	108	46	67.0266	302	3613	1.26114	128048	40.269
AFLP40_120_9.txt	132232	132154	0.06 %	113	43	63.4272	188	911	0.932515	132154	41.1746
AFLP40_120_10.txt	128250	128238	0.01 %	109	44	62.9398	288	3384	1.97889	128238	27.1708
AFLP40_120_11.txt	117856	117845	0.01 %	102	35	52.5957	450	7860	1.64553	117845	89.1692
AFLP40_120_12.txt	128803	128788	0.01 %	111	39	55.8661	235	2344	1.71151	128788	15.8338
AFLP40_120_13.txt	130399	130284	0.09 %	112	40	59.6231	189	1888	1.89964	130284	50.9433
AFLP40_120_14.txt	126375	126334	0.03 %	108	42	56.5229	330	3822	1.10598	126334	28.3761
AFLP40_120_15.txt	124067	123964	0.08 %	106	42	55.5988	355	5222	1.66985	123964	45.5235
AFLP40_120_16.txt	122755	122699	0.05 %	105	42	55.6345	382	5603	0.994091	122699	35.5417
AFLP40_120_17.txt	128552	128512	0.03 %	110	40	59.2218	247	2002	1.46282	128512	22.6933
AFLP40_120_18.txt	129155	129105	0.04 %	109	48	63.2101	257	2830	1.17807	129105	26.0443
AFLP40_120_19.txt	125930	125918	0.01 %	108	42	55.9477	282	4316	1.57588	125918	47.9601
AFLP40_120_20.txt	129246	129228	0.01 %	111	41	55.0874	229	2344	1.82896	129228	15.0657
AFLP40_120_21.txt	129889	129879	0.01 %	111	41	65.1844	227	2060	1.97041	129879	100.799
AFLP40_120_22.txt	130133	130019	0.09 %	113	35	58.1789	165	1230	1.22381	130019	22.4918
AFLP40_120_23.txt	126625	126617	0.01 %	107	46	63.7389	320	4557	1.94065	126617	32.5055
AFLP40_120_24.txt	125749	125695	0.04 %	109	36	54.0083	276	2859	1.29703	125695	25.6593
AFLP40_120_25.txt	126750	126738	0.01 %	109	39	59.5447	269	3344	1.76586	126738	70.2139
AFLP40_120_26.txt	126558	126522	0.03 %	107	46	61.5205	313	3858	1.29135	126522	21.6072
AFLP40_120_27.txt	126150	126100	0.04 %	108	43	58.6102	298	3554	1.33591	126100	23.8144
AFLP40_120_28.txt	126559	126436	0.10 %	107	45	62.9921	318	4724	1.70805	126436	60.8925
AFLP40_120_29.txt	133209	133152	0.04 %	112	50	66.5014	188	1687	1.41951	133152	20.2973
AFLP40_120_30.txt	135923	135910	0.01 %	115	50	63.5825	127	458	1.69661	135910	10.2549

A.2 RESULTADOS DE INSTANCIAS TIPO B

En esta sección se muestran los resultados obtenidos por la formulación matemática.

Tabla A.2: Resultados obtenidos por la formulación matemática para instancias B.

Instancia	Cota dual	Cota primal	GAP	aa	ac	at	an	as	ae	Función objetivo	Tiempo
AFLP80_250_1.txt	286194	285982	0.07 %	241	106	140.097	214	3390	3.09818	285982	133.286
AFLP80_250_2.txt	284439	284358	0.03 %	242	96	129.588	184	2186	3.74058	284358	163.985
AFLP80_250_3.txt	286614	286496	0.04 %	239	114	148.974	254	4250	3.72829	286496	357.971
AFLP80_250_4.txt	289383	289235	0.05 %	247	96	127.93	66	220	2.59494	289235	123.721
AFLP80_250_5.txt	287996	287712	0.10 %	241	108	144.865	211	1687	3.81723	287712	245.499
AFLP80_250_6.txt	290836	290792	0.02 %	245	108	140.769	117	725	3.1682	290792	133.208
AFLP80_250_7.txt	293297	293227	0.02 %	244	120	147.173	140	1274	2.958	293227	94.0833
AFLP80_250_8.txt	285879	285782	0.03 %	242	102	132.356	181	1775	2.41473	285782	110.079
AFLP80_250_9.txt	283865	283666	0.07 %	242	96	128.813	186	2514	2.93939	283666	320.705
AFLP80_250_10.txt	284842	284794	0.02 %	243	94	136.832	161	1977	3.75237	284794	138.601
AFLP80_250_11.txt	288134	288016	0.04 %	243	107	139.636	166	1523	2.64329	288016	105.802
AFLP80_250_12.txt	289206	288926	0.10 %	246	102	131.842	90	381	3.74104	288926	414.983
AFLP80_250_13.txt	284593	284475	0.04 %	240	105	134.362	215	3513	2.28172	284475	171.899
AFLP80_250_14.txt	288865	288637	0.08 %	244	106	135.707	138	1330	3.77413	288637	207.211
AFLP80_250_15.txt	288451	288351	0.03 %	243	109	142.847	170	1932	3.09712	288351	103.189
AFLP80_250_16.txt	288389	288125	0.09 %	244	103	135.029	130	709	3.26513	288125	153.652
AFLP80_250_17.txt	284671	284643	0.01 %	242	96	137.03	220	2366	3.77716	284643	222.07
AFLP80_250_18.txt	286633	286369	0.09 %	244	96	128.718	140	506	3.06121	286369	282.44
AFLP80_250_19.txt	292065	291894	0.06 %	246	109	149.322	91	408	3.42188	291894	117.745
AFLP80_250_20.txt	285900	285875	0.01 %	243	101	127.863	151	1749	3.38723	285875	345.307
AFLP80_250_21.txt	285308	285149	0.06 %	243	101	126.726	178	1922	2.81687	285149	799.931
AFLP80_250_22.txt	283899	283874	0.01 %	243	91	125.538	164	2197	3.50392	283874	229.584
AFLP80_250_23.txt	286693	286562	0.05 %	242	108	133.829	186	1940	2.45148	286562	420.624
AFLP80_250_24.txt	286008	285733	0.10 %	244	97	126.797	151	1403	2.4662	285733	487.98
AFLP80_250_25.txt	292366	292285	0.03 %	244	117	146.016	154	1251	2.73058	292285	91.9387
AFLP80_250_26.txt	287978	287705	0.09 %	246	97	126.986	116	405	3.37389	287705	448.479
AFLP80_250_27.txt	289060	289007	0.02 %	244	105	140.733	145	660	4.10542	289007	167.453
AFLP80_250_28.txt	286970	286845	0.04 %	244	99	131.708	148	1555	3.63515	286845	247.267
AFLP80_250_29.txt	287409	287142	0.09 %	245	97	131.874	109	513	3.50756	287142	137.89
AFLP80_250_30.txt	285434	285197	0.08 %	245	95	119.275	110	577	3.05801	285197	485.733

APÉNDICE B

RESULTADOS DEL MÉTODO HEURÍSTICO

En este apéndice se muestran las tablas de resultados completas que se obtuvieron mediante la implementación método heurístico (algoritmo constructivo, búsqueda local de la primera mejora y búsqueda local de la mayor mejora) para las diferentes 30 instancias probadas de cada tamaño. En cada tabla, se detalla el valor de cada indicador obtenido, así como el valor de la función objetivo encontrada.

B.1 RESULTADOS DE INSTANCIAS TIPO A

En esta sección se muestran los resultados obtenidos por el método heurístico.

Tabla B.1: Resultados obtenidos por el algoritmo constructivo para instancias A.

Instancia	aa	ac	at	an	ae	as	Función objetivo	Tiempo
AFLP40_120_1.txt	57	19	30.4446	2384	3.89138	105835	63857.95	0.008031
AFLP40_120_2.txt	56	33	43.5454	2978	3.87293	93357	66947.40	0.007707
AFLP40_120_3.txt	76	31	44.4781	1302	3.11764	56472	87772.29	0.00768
AFLP40_120_4.txt	84	35	48.6484	980	2.17242	34684	97198.92	0.007884
AFLP40_120_5.txt	68	34	47.1672	1503	3.05342	70330	80722.36	0.007801
AFLP40_120_6.txt	66	34	43.6327	1865	2.75723	78975	78063.74	0.007647
AFLP40_120_7.txt	55	30	39.6192	2645	3.75432	108754	65279.89	0.007832
AFLP40_120_8.txt	49	27	37.0197	2781	5.1297	119652	58380.46	0.00745
AFLP40_120_9.txt	80	34	46.0078	1089	2.85605	34654	92643.93	0.007481
AFLP40_120_10.txt	84	41	64.0681	1250	3.27134	32260	100056.54	0.007711
AFLP40_120_11.txt	74	25	43.7781	1371	3.33115	62550	84215.43	0.007265
AFLP40_120_12.txt	83	35	47.5574	1329	2.3088	33770	95745.32	0.007446
AFLP40_120_13.txt	83	39	55.1578	1201	2.74314	41240	97751.49	0.00771
AFLP40_120_14.txt	64	24	37.0954	1914	4.15018	82951	73040.07	0.007671
AFLP40_120_15.txt	75	36	46.2009	1490	3.14835	56302	88007.95	0.00761
AFLP40_120_16.txt	76	26	40.204	1402	2.67769	53103	85917.20	0.007856
AFLP40_120_17.txt	59	33	41.736	2509	3.96014	86087	70171.48	0.007353
AFLP40_120_18.txt	75	31	45.5872	1536	3.50216	56803	86690.97	0.008644
AFLP40_120_19.txt	70	36	45.6852	1561	3.32711	65823	82998.46	0.007618
AFLP40_120_20.txt	86	36	50.3953	1112	2.37821	31994	99485.29	0.007928
AFLP40_120_21.txt	58	28	45.6551	2539	4.33366	94995	68409.83	0.007912
AFLP40_120_22.txt	78	34	54.6828	1712	2.99736	33242	90888.44	0.007635
AFLP40_120_23.txt	93	43	60.1859	761	2.60629	23515	109503.37	0.007525
AFLP40_120_24.txt	76	27	42.1568	1368	3.35595	57748	86510.76	0.00782
AFLP40_120_25.txt	91	41	61.3018	851	1.98473	26208	106989.73	0.007441
AFLP40_120_26.txt	62	29	43.3013	2304	4.30994	81301	72520.13	0.007722
AFLP40_120_27.txt	66	36	45.5162	1897	3.52835	72503	78732.49	0.007324
AFLP40_120_28.txt	67	29	40.4457	1825	3.05321	78813	77563.02	0.007689
AFLP40_120_29.txt	77	42	55.132	1355	2.82336	48676	92427.30	0.007493
AFLP40_120_30.txt	76	33	43.9501	1657	3.48977	45987	87796.86	0.007694

Tabla B.2: Resultados obtenidos por la búsqueda local de la primera mejora para instancias A.

Instancia	aa	ac	at	an	ae	as	Función objetivo	Tiempo
AFLP40_120_1.txt	107	45	57.8737	322	1.42366	3851	123896.25	0.09954
AFLP40_120_2.txt	107	36	52.1397	313	1.48459	5119	121100.62	0.168092
AFLP40_120_3.txt	105	40	56.2249	369	1.16778	6512	120435.39	0.20649
AFLP40_120_4.txt	106	39	52.6048	354	1.11304	5840	120826.18	0.087784
AFLP40_120_5.txt	107	44	60.4263	316	1.36821	3393	123897.38	0.116316
AFLP40_120_6.txt	106	45	58.2784	354	1.3554	4679	122906.17	0.078678
AFLP40_120_7.txt	111	45	60.212	214	1.40271	2322	128220.69	0.090752
AFLP40_120_8.txt	108	46	67.0266	302	1.60791	3613	126097.58	0.130741
AFLP40_120_9.txt	113	43	63.4272	188	1.15597	911	130029.43	0.141741
AFLP40_120_10.txt	108	42	59.9091	306	1.60754	3632	124381.98	0.125884
AFLP40_120_11.txt	101	35	54.0224	449	1.3513	8938	114927.75	0.069736
AFLP40_120_12.txt	111	39	55.8661	235	1.24583	2344	126249.63	0.110699
AFLP40_120_13.txt	108	48	66.2087	342	1.62118	3015	126471.14	0.160624
AFLP40_120_14.txt	108	39	54.509	333	1.33706	4032	123041.93	0.124401
AFLP40_120_15.txt	106	42	55.5988	355	1.4917	5222	121906.27	0.162928
AFLP40_120_16.txt	105	31	47.6483	407	1.46803	6581	117320.44	0.10863
AFLP40_120_17.txt	110	27	48.426	233	1.23056	2484	121507.50	0.061132
AFLP40_120_18.txt	109	48	63.2101	257	1.2846	2830	127220.77	0.077129
AFLP40_120_19.txt	109	38	51.6826	266	1.08046	3910	123549.41	0.096289
AFLP40_120_20.txt	111	41	55.2715	229	1.50205	2344	126721.80	0.172847
AFLP40_120_21.txt	111	40	60.8874	222	1.25815	1584	127008.40	0.159966
AFLP40_120_22.txt	111	41	61.717	270	1.36703	1299	127301.39	0.056804
AFLP40_120_23.txt	107	44	60.935	350	1.85143	4713	123975.77	0.143194
AFLP40_120_24.txt	109	36	54.0083	276	1.51788	2859	123305.21	0.09335
AFLP40_120_25.txt	109	39	57.2269	267	1.17162	2406	124346.91	0.122387
AFLP40_120_26.txt	107	46	60.5205	313	1.30761	3858	124408.39	0.174579
AFLP40_120_27.txt	106	40	53.6168	342	1.31504	4476	121195.94	0.070739
AFLP40_120_28.txt	107	39	55.5665	359	1.24343	4020	122112.19	0.119006
AFLP40_120_29.txt	112	50	66.4436	190	1.1594	1576	131086.06	0.158697
AFLP40_120_30.txt	115	49	61.9161	120	1.67375	375	133492.74	0.10825

Tabla B.3: Resultados obtenidos por la búsqueda local de la mayor mejora para instancias A.

Instancia	aa	ac	at	an	ae	as	Función objetivo	Tiempo
AFLP40_120_1.txt	107	44	56.5289	383	1.42291	3737	123449.55	0.257171
AFLP40_120_2.txt	106	40	55.9209	337	1.50648	5725	121462.99	0.194977
AFLP40_120_3.txt	102	52	65.222	434	1.37939	8194	121308.08	0.197974
AFLP40_120_4.txt	107	42	57.5675	331	1.29478	4383	123099.06	0.142275
AFLP40_120_5.txt	106	40	56.7054	359	1.33905	4488	121490.33	0.226087
AFLP40_120_6.txt	108	41	56.3233	311	1.3095	3665	123738.93	0.139659
AFLP40_120_7.txt	110	47	61.3295	259	1.38376	2309	127785.42	0.222355
AFLP40_120_8.txt	108	46	67.0266	302	1.60791	3613	126097.58	0.218415
AFLP40_120_9.txt	113	43	63.4272	188	1.15597	911	130029.43	0.195244
AFLP40_120_10.txt	109	43	62.889	278	1.5449	3150	125946.89	0.184628
AFLP40_120_11.txt	100	40	58.419	470	1.23321	9973	115594.95	0.194186
AFLP40_120_12.txt	111	39	55.8661	235	1.24583	2344	126249.63	0.2189
AFLP40_120_13.txt	111	43	62.8685	240	1.67046	2328	127987.18	0.160412
AFLP40_120_14.txt	105	36	51.3676	400	1.34976	4926	118921.00	0.191277
AFLP40_120_15.txt	105	46	58.8634	379	1.69125	7046	122246.93	0.199875
AFLP40_120_16.txt	104	35	49.5414	367	1.21592	7315	117531.88	0.174611
AFLP40_120_17.txt	110	40	59.2218	247	1.46045	2002	125841.25	0.253566
AFLP40_120_18.txt	109	48	63.2101	257	1.2846	2830	127220.77	0.19258
AFLP40_120_19.txt	104	52	63.073	410	1.6294	6153	123121.77	0.168949
AFLP40_120_20.txt	110	42	57.2457	273	1.75975	2645	126154.00	0.143299
AFLP40_120_21.txt	111	41	65.0535	219	1.42506	1770	127696.56	0.166237
AFLP40_120_22.txt	112	37	59.7297	208	1.36341	1376	127165.07	0.109879
AFLP40_120_23.txt	107	45	64.8572	356	1.69698	4724	124596.66	0.10757
AFLP40_120_24.txt	107	31	50.0988	320	1.7203	4965	119661.56	0.140967
AFLP40_120_25.txt	109	39	59.5447	269	1.32464	3344	124601.37	0.107925
AFLP40_120_26.txt	107	46	60.5205	313	1.30761	3858	124408.39	0.196679
AFLP40_120_27.txt	106	44	59.7995	363	1.39524	5012	122806.59	0.143377
AFLP40_120_28.txt	107	45	62.9921	318	1.61218	4724	124439.67	0.199157
AFLP40_120_29.txt	112	50	66.8489	195	1.26182	1483	131130.90	0.166112
AFLP40_120_30.txt	115	50	62.5825	127	1.64672	458	133800.50	0.190335

B.2 RESULTADOS DE INSTANCIAS TIPO B

En esta sección se muestran los resultados obtenidos por el método heurístico.

Tabla B.4: Resultados obtenidos por el algoritmo constructivo para instancias B.

Instancia	aa	ac	at	an	ae	as	Función objetivo	Tiempo
AFLP80_250_1.txt	173	76	105.923	2356	6.94262	204370	202974.26	0.026453
AFLP80_250_2.txt	155	65	97.4683	3690	8.15496	326759	181389.92	0.027686
AFLP80_250_3.txt	178	89	118.679	2228	7.66328	185845	212514.68	0.028338
AFLP80_250_4.txt	152	71	94.8341	3638	7.51168	313794	179484.52	0.028576
AFLP80_250_5.txt	186	70	104.009	1915	7.22004	162042	214328.32	0.029258
AFLP80_250_6.txt	162	72	101.397	3451	6.74918	224776	189611.38	0.028624
AFLP80_250_7.txt	133	77	91.9274	4090	9.80955	491847	163252.17	0.02792
AFLP80_250_8.txt	159	62	88.9875	2913	6.98937	290467	184089.36	0.029105
AFLP80_250_9.txt	158	71	94.2014	2799	8.24716	279391	185989.77	0.02749
AFLP80_250_10.txt	159	73	101.018	2889	7.73623	289326	188129.68	0.02638
AFLP80_250_11.txt	170	89	112.286	2498	8.07803	227323	204061.63	0.0276
AFLP80_250_12.txt	154	65	83.9673	3203	8.44429	357026	179858.42	0.028558
AFLP80_250_13.txt	130	67	87.9619	4249	8.8344	552555	157706.18	0.027065
AFLP80_250_14.txt	164	63	85.5231	2461	8.58058	267202	189371.39	0.028125
AFLP80_250_15.txt	165	74	104.139	2811	8.13698	258577	194502.37	0.028247
AFLP80_250_16.txt	169	70	96.3525	2506	7.64256	214675	196540.26	0.027431
AFLP80_250_17.txt	191	85	121.37	1791	6.13465	129591	224505.38	0.027082
AFLP80_250_18.txt	136	56	83.8676	4638	10.4328	430063	159092.67	0.027564
AFLP80_250_19.txt	141	76	102.591	4233	9.17554	381310	170756.75	0.027144
AFLP80_250_20.txt	136	62	89.463	4468	8.66852	485919	161704.34	0.02731
AFLP80_250_21.txt	176	93	112.35	2229	6.65199	192872	210849.92	0.030649
AFLP80_250_22.txt	174	68	98.4673	2620	6.21356	223033	201078.42	0.028734
AFLP80_250_23.txt	176	75	101.895	2189	6.13171	200173	205365.40	0.029094
AFLP80_250_24.txt	155	74	97.4284	3591	7.90736	307129	183513.87	0.027637
AFLP80_250_25.txt	172	79	106.193	2712	7.37285	231080	202705.39	0.02725
AFLP80_250_26.txt	183	80	106.185	2243	6.64637	139585	213435.99	0.027203
AFLP80_250_27.txt	206	88	119.857	1132	6.33919	71952	240207.14	0.02688
AFLP80_250_28.txt	144	67	89.5028	3726	8.04011	426547	171043.76	0.027084
AFLP80_250_29.txt	162	70	98.7268	2494	6.8255	279243	190353.66	0.027952
AFLP80_250_30.txt	146	67	84.6365	4152	9.7787	331429	171353.81	0.027718

Tabla B.5: Resultados obtenidos por la búsqueda local de la primera mejora para instancias B.

Instancia	aa	ac	at	an	ae	as	Función objetivo	Tiempo
AFLP80_250_1.txt	241	106	138.992	214	3.54173	3390	281573.27	4.65617
AFLP80_250_2.txt	243	87	122.593	154	3.40644	1868	276877.39	2.62538
AFLP80_250_3.txt	235	115	147.72	354	3.42726	8984	278261.27	3.79139
AFLP80_250_4.txt	247	95	126.336	66	3.24204	220	283323.04	1.87639
AFLP80_250_5.txt	241	105	141.072	211	3.32598	1628	281165.81	2.17563
AFLP80_250_6.txt	246	100	130.209	91	2.90047	429	283937.09	3.04467
AFLP80_250_7.txt	246	109	134.914	89	3.0205	488	286660.30	3.3126
AFLP80_250_8.txt	242	102	129.356	181	2.76432	1775	280275.11	4.17564
AFLP80_250_9.txt	239	97	127.586	249	2.90912	4023	275802.74	2.84129
AFLP80_250_10.txt	243	94	136.832	161	3.71765	1977	280045.69	2.50451
AFLP80_250_11.txt	244	98	129.243	133	3.04343	844	281302.78	5.84879
AFLP80_250_12.txt	243	106	134.179	179	3.63027	1287	282755.40	1.02
AFLP80_250_13.txt	236	105	133.93	303	2.88856	7714	275420.03	2.86011
AFLP80_250_14.txt	242	111	139.8	182	3.60273	2541	283577.01	2.91334
AFLP80_250_15.txt	242	104	137.886	185	3.25864	2181	281628.67	2.68908
AFLP80_250_16.txt	243	95	124.907	156	3.35091	1278	279100.83	1.34579
AFLP80_250_17.txt	243	89	130.658	204	3.08019	1890	278133.78	3.10532
AFLP80_250_18.txt	240	100	131.128	247	2.79433	2470	277893.29	2.19715
AFLP80_250_19.txt	242	109	145.41	194	3.25052	1526	283615.51	3.94326
AFLP80_250_20.txt	242	102	125.305	172	2.62228	2265	279883.77	3.38743
AFLP80_250_21.txt	240	104	129.633	255	2.93352	3529	278746.52	5.6921
AFLP80_250_22.txt	240	90	124.58	243	3.0629	4090	274758.96	3.67848
AFLP80_250_23.txt	243	98	123.298	171	3.21438	1589	279677.90	3.56782
AFLP80_250_24.txt	244	97	124.797	151	3.17175	1403	280595.90	3.58555
AFLP80_250_25.txt	244	107	136.649	136	2.95741	1120	284293.06	4.08372
AFLP80_250_26.txt	243	107	134.409	179	3.29694	1762	283032.82	2.51473
AFLP80_250_27.txt	243	98	134.326	163	3.57747	1860	280791.78	2.6881
AFLP80_250_28.txt	243	101	132.816	172	3.1221	2076	281383.48	2.01649
AFLP80_250_29.txt	245	97	130.281	109	3.19584	513	282177.43	3.38677
AFLP80_250_30.txt	241	98	122.726	212	3.39666	2312	277587.12	2.15483

Tabla B.6: Resultados obtenidos por la búsqueda local de la mayor mejora para instancias B.

Instancia	aa	ac	at	an	ae	as	Función objetivo	Tiempo
AFLP80_250_1.txt	240	109	141.907	236	3.61544	4014	281606.38	4.746227
AFLP80_250_2.txt	240	102	134.616	227	3.15767	3339	279083.76	5.201034
AFLP80_250_3.txt	238	114	147.967	276	3.28465	5363	281402.80	4.603882
AFLP80_250_4.txt	246	98	129.583	88	3.46337	478	283721.42	7.509934
AFLP80_250_5.txt	242	103	139.894	191	3.30346	1827	281897.02	4.340332
AFLP80_250_6.txt	243	106	137.044	157	3.19118	1278	283379.30	5.589706
AFLP80_250_7.txt	244	120	146.173	140	2.9676	1274	288786.80	6.3184
AFLP80_250_8.txt	241	95	130.355	261	3.09038	2486	277858.40	5.144945
AFLP80_250_9.txt	240	96	128.162	235	3.02079	4073	276924.01	5.11482
AFLP80_250_10.txt	240	98	139.768	220	3.64031	3462	278655.45	5.0696
AFLP80_250_11.txt	242	102	133.191	201	3.09417	1418	280941.70	6.56121
AFLP80_250_12.txt	244	105	131.455	132	3.2135	1068	283595.53	5.168612
AFLP80_250_13.txt	239	107	136.161	238	2.83548	4557	279457.22	7.578325
AFLP80_250_14.txt	242	106	134.915	185	3.54159	2530	282185.96	5.527235
AFLP80_250_15.txt	242	101	135.115	188	3.12777	2185	280908.13	4.699693
AFLP80_250_16.txt	243	102	130.112	158	3.40038	1846	281711.70	4.752139
AFLP80_250_17.txt	242	96	137.03	220	3.1238	2366	279819.04	3.472318
AFLP80_250_18.txt	244	96	127.773	139	2.63448	506	280906.81	6.025496
AFLP80_250_19.txt	245	109	146.432	122	3.29483	674	287107.42	6.069296
AFLP80_250_20.txt	245	93	119.276	112	2.73368	723	280346.20	6.0416
AFLP80_250_21.txt	236	105	130.818	331	3.26293	6942	275396.51	3.533791
AFLP80_250_22.txt	240	94	129.03	230	3.05829	3431	276513.14	5.217766
AFLP80_250_23.txt	241	111	135.866	207	3.18354	2718	282475.13	5.866416
AFLP80_250_24.txt	240	99	127.805	233	3.37249	2703	277661.78	5.459303
AFLP80_250_25.txt	243	110	141.942	180	3.17334	1893	284850.46	4.1783
AFLP80_250_26.txt	244	95	127.271	137	3.25773	1364	280679.51	4.980937
AFLP80_250_27.txt	244	105	139.733	145	3.41306	660	284426.21	2.98393
AFLP80_250_28.txt	241	104	136.059	219	3.08408	3222	280727.53	7.509886
AFLP80_250_29.txt	244	98	132.545	130	3.19864	1042	281954.78	5.552848
AFLP80_250_30.txt	241	98	122.726	212	3.39666	2312	277923.39	4.759042

B.3 RESULTADOS DE INSTANCIAS TIPO C

En esta sección se muestran los resultados obtenidos por el método heurístico.

Tabla B.7: Resultados obtenidos por el algoritmo constructivo para instancias C.

Instancia	aa	ac	at	an	ae	as	Función objetivo	Tiempo
AFLP200_600_1.txt	267	134	151.736	13743	12.4508	4741000	350585.68	0.146104
AFLP200_600_2.txt	308	136	162.803	12102	11.6855	3628237	383629.22	0.148996
AFLP200_600_3.txt	287	127	149.676	12020	13.8928	3846555	361552.43	0.149381
AFLP200_600_4.txt	226	107	131.228	19196	13.3135	5175090	299759.05	0.147082
AFLP200_600_5.txt	256	120	143.873	16497	14.102	4574448	331044.98	0.147254
AFLP200_600_6.txt	276	134	149.288	13366	13.331	4367352	356069.42	0.149662
AFLP200_600_7.txt	255	104	126.77	13729	13.7776	4762714	328952.90	0.148695
AFLP200_600_8.txt	253	130	143.149	14207	13.6925	5244497	339422.12	0.146463
AFLP200_600_9.txt	317	138	162.743	9807	11.7179	3294569	392084.78	0.14667
AFLP200_600_10.txt	325	153	171.061	10713	12.5594	3060278	401501.82	0.146599
AFLP200_600_11.txt	338	145	165.231	9148	9.7697	3021289	412814.96	0.146202
AFLP200_600_12.txt	232	124	137.944	16272	15.3736	5511607	317175.83	0.147028
AFLP200_600_13.txt	292	124	143.528	14622	11.1419	3740042	361245.41	0.146279
AFLP200_600_14.txt	286	145	164.987	10965	10.8668	4202873	370899.11	0.145187
AFLP200_600_15.txt	354	151	175.476	7406	9.85141	2505227	427929.01	0.145079
AFLP200_600_16.txt	190	96	109.885	20405	15.6417	7026883	276416.50	0.147944
AFLP200_600_17.txt	340	141	163.043	8080	10.2883	2913279	413635.92	0.147191
AFLP200_600_18.txt	274	127	147.424	11797	11.0465	4550732	355307.37	0.146901
AFLP200_600_19.txt	253	131	148.693	16946	13.1068	4816083	333144.81	0.147043
AFLP200_600_20.txt	283	132	151.242	13337	12.1326	4328576	362286.22	0.147814
AFLP200_600_21.txt	230	102	116.978	15415	14.6127	5440923	307653.30	0.146154
AFLP200_600_22.txt	294	137	158.124	13680	12.667	3670761	368356.71	0.1473
AFLP200_600_23.txt	280	130	148.404	12395	12.277	4490079	361073.89	0.14718
AFLP200_600_24.txt	262	138	152.245	14596	12.637	4703692	345429.12	0.147444
AFLP200_600_25.txt	275	128	151.393	15821	12.2314	3917355	346714.99	0.146572
AFLP200_600_26.txt	205	124	134.911	23871	15.0092	5662938	283750.40	0.147669
AFLP200_600_27.txt	349	136	158.534	7951	11.1031	2649746	418510.17	0.148046
AFLP200_600_28.txt	267	114	133.552	14965	12.0246	3940830	334500.96	0.146237
AFLP200_600_29.txt	263	118	138.362	12084	12.3537	4497677	340464.34	0.147194
AFLP200_600_30.txt	262	144	162.293	19314	13.4299	4095334	337211.63	0.147547

Tabla B.8: Resultados obtenidos por la búsqueda local de la primera mejora para instancias C.

Instancia	aa	ac	at	an	ae	as	Función objetivo	Tiempo
AFLP200_600_1.txt	568	222	248.001	836	3.45566	48589	648295.556	95.026
AFLP200_600_2.txt	589	215	251.773	265	3.27496	4799	668037.786	86.002
AFLP200_600_3.txt	580	241	271.569	440	3.26036	10688	667399.816	114.849
AFLP200_600_4.txt	569	223	255.445	711	3.5258	40689	650342.97	60.009
AFLP200_600_5.txt	581	225	261.971	435	3.60888	15266	663525.648	72.889
AFLP200_600_6.txt	574	210	240.701	614	3.68903	25540	650580.403	94.352
AFLP200_600_7.txt	580	220	253.969	457	3.60016	15901	660458.926	100.319
AFLP200_600_8.txt	576	213	242.726	533	3.36401	21942	653545.421	99.985
AFLP200_600_9.txt	569	224	257.178	737	3.57045	46753	650805.375	69.837
AFLP200_600_10.txt	573	203	238.186	609	3.70989	27265	647603.239	77.773
AFLP200_600_11.txt	582	228	258.451	439	3.23518	13941	664869.028	69.919
AFLP200_600_12.txt	578	243	269.725	517	3.28625	20188	665736.005	79.936
AFLP200_600_13.txt	570	213	244.807	708	2.88973	34265	647654.323	112.852
AFLP200_600_14.txt	576	205	242.081	555	3.68497	20984	651481.437	115.178
AFLP200_600_15.txt	577	217	245.004	526	3.3263	25052	655807.55	97.654
AFLP200_600_16.txt	581	216	247.482	425	3.42089	15843	659823.719	149.378
AFLP200_600_17.txt	584	232	258.9	360	3.44092	10146	667975.552	90.59
AFLP200_600_18.txt	572	241	270.987	678	3.18041	35465	659343.391	78.801
AFLP200_600_19.txt	570	232	265.762	691	3.81829	40385	654670.879	96.593
AFLP200_600_20.txt	577	202	238.051	521	3.52878	24707	651384.048	101.821
AFLP200_600_21.txt	577	196	227.852	514	3.40662	20508	648816.942	78.049
AFLP200_600_22.txt	573	217	246.305	612	3.29997	33848	651936.977	103.72
AFLP200_600_23.txt	572	216	246.798	628	3.55381	35053	650757.711	58.875
AFLP200_600_24.txt	582	206	239.089	395	3.32099	15866	657504.659	84.13
AFLP200_600_25.txt	579	201	233.131	479	3.60839	17516	652620.099	72.153
AFLP200_600_26.txt	576	226	258.089	566	3.41098	26186	658345.858	97.215
AFLP200_600_27.txt	569	216	246.018	735	3.50428	37649	647593.718	84.436
AFLP200_600_28.txt	579	224	252.439	488	3.58389	17417	660288.459	121.491
AFLP200_600_29.txt	575	239	269.402	573	3.62336	26012	661739.656	120.808
AFLP200_600_30.txt	572	236	265.549	688	3.59286	32262	657548.806	80.785

Tabla B.9: Resultados obtenidos por la búsqueda local de la mayor mejora para instancias C.

Instancia	aa	ac	at	an	ae	as	Función objetivo	Tiempo
AFLP200_600_1.txt	573	222	251.539	671	3.41294	35811	653682.304	187.472896
AFLP200_600_2.txt	580	220	254.673	462	3.49616	12711	660482.026	174.474004
AFLP200_600_3.txt	578	237	266.988	510	3.31422	17095	663941.172	195.342619
AFLP200_600_4.txt	572	228	261.52	628	3.62977	29997	655186.947	146.537918
AFLP200_600_5.txt	579	218	258.184	482	3.33567	21289	659382.857	161.135746
AFLP200_600_6.txt	584	207	241.034	358	3.39811	8510	659920.311	138.668338
AFLP200_600_7.txt	575	225	256.698	574	3.54258	24808	656948.138	161.018305
AFLP200_600_8.txt	576	241	272.332	554	3.23859	23092	663483.979	176.231537
AFLP200_600_9.txt	566	217	248.189	805	3.20921	51912	645103.941	158.00433
AFLP200_600_10.txt	563	239	268.207	834	3.73817	59273	649703.247	154.371401
AFLP200_600_11.txt	580	214	244.517	464	3.50827	16554	658004.067	151.099798
AFLP200_600_12.txt	573	228	255.813	635	3.53419	26646	655566.179	159.631972
AFLP200_600_13.txt	576	213	248.503	569	3.44637	21484	654090.777	174.728721
AFLP200_600_14.txt	577	210	246.838	542	3.64398	21743	654223.628	128.952813
AFLP200_600_15.txt	579	235	256.505	480	3.1958	19232	663432.4	177.550921
AFLP200_600_16.txt	578	235	265.238	528	3.53756	18313	663282.686	155.593056
AFLP200_600_17.txt	593	224	252.717	149	3.37974	1706	674477.734	134.223809
AFLP200_600_18.txt	582	226	256.693	409	3.45235	11120	664216.735	151.254099
AFLP200_600_19.txt	584	212	249.941	352	3.40022	11586	662097.982	167.652957
AFLP200_600_20.txt	579	220	257.749	466	3.70476	19775	659877.126	143.566186
AFLP200_600_21.txt	576	210	238.949	536	3.29293	24941	652437.603	190.698846
AFLP200_600_22.txt	567	244	271.6	763	3.5792	51105	655265.97	181.3847
AFLP200_600_23.txt	570	229	259.631	694	3.65562	41148	653296.142	152.33782
AFLP200_600_24.txt	581	223	255.702	423	3.14242	15491	662366.352	158.332556
AFLP200_600_25.txt	570	224	254.934	681	3.81008	35039	651543.798	129.636428
AFLP200_600_26.txt	577	235	264.937	518	3.63187	24063	662329.517	154.311331
AFLP200_600_27.txt	573	236	267.6	629	3.82008	27733	658790.338	159.271954
AFLP200_600_28.txt	581	231	259.278	430	3.4692	14602	664740.74	182.596763
AFLP200_600_29.txt	572	234	266.435	635	3.7259	34363	657224.72	179.929806
AFLP200_600_30.txt	573	241	274.7	641	3.33931	32754	660740.471	174.279453

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AAKIL, M., N. XIAOFENG y P. SHALIGRAM, «Optimization models in emergency logistics: A review.», *Socio-Economic Planning Sciences*, **46**(2012), págs. 4–13, 2011.
- [2] ACOSTA, L. y D. ALMENDRAS, «Localización de albergues para hogares afectados por un desastre natural.», *XLIII Simposio Brasileiro de PESQUISA OPERACIONAL.*, 2011.
- [3] APTE, A., «Humanitarian logistics: A new field of research and action. Found.», *Trends Technol. Inf. Oper. Manag.*, **3**, 2009.
- [4] BALCIK, B. y B. BEAMON, «Facility location in humanitarian relief.», *International Journal of Logistics: Research and Applications*, **11**(2), págs. 101–21, 2008.
- [5] BELARDO, S., J. HARRALD, W. WALLACE y J. WARD, «A partial covering approach to siting response resources for major maritime oil spills.», *Management Science*, **30**(10), págs. 1184–96, 1984.
- [6] BOCAREJO, J. y D. OVIEDO, «Transport accessibility and social inequities: a tool for identification of mobility needs and evaluation of transport investments.», *Journal of Transport Geography*, **24**, 2012.
- [7] BOSQUE SENDRA, J., *Sistemas de información geográfica*, 1992.

-
- [8] BOSQUE SENDRA, J. y S. FRANCO MAASS, «Modelos de localización: asignación y evaluación multicriterio para la localización de instalaciones no deseables», *Ser. Geográfica*, **5**, 1995.
- [9] BOSQUE SENDRA, J. y A. MORENO JIMÉNEZ, *Facility location analysis and planning: a GIS approach*, 1990.
- [10] CANALES, L. y C. VERGARA, «Localización de albergues en logística humanitaria», , 2017.
- [11] CASCETTA, E., A. CARTENI y M. MONTANINO, «A behavioral model of accessibility based on the number of available opportunities.», *Journal of Transport Geography*, **51**, 2016.
- [12] CHURCH, B. y S. A. KOTLEBA, «The maximal covering location problem.», *Papers of the Regional Science Association*, **32**, 1974.
- [13] CORNEJO, C., J. VARGAS, L. ARAGON y V. SERPA, *Localización de almacenes y distribución de ayuda humanitaria para atención de damnificados en caso de desastre natural*, 2013.
- [14] DÍAZ, G. F. G. H. G. J. L. M. M. P. T. F., A., *Optimización Heurística y Redes Neuronales*, 1996.
- [15] DE LA SALUD, O. P., *Manual para el manejo logístico de suministros humanitarios*, 2000.
- [16] GEURS, K. y B. VAN WEE, «Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions.», *Journal of Transport Geography*, **12**(2), págs. 127–140, 2004.
- [17] GUNN, S., «The language of disasters: a brief terminology of disaster management and humanitarian action.», *Basics of international humanitarian missions. Fordham University Press*, 2003.

-
- [18] HANDY, S. y NIEMEIER, «Measuring accesibility: an exploration of issues and alternatives.», *Environmet and Planning*, **29**, 1997.
- [19] IBARRA-ROJAS, O., L. HERNÁNDEZ y L. OZUNA, «The Accessibility Vehicle Routing Problem.», *Journal of Cleaner Production.*, **172**(2018), págs. 1514–1528, 2017.
- [20] INSTITUTE, F., «Logistics and the effective delivery of humanitarian relief.», *Fritz Institute*, 2005.
- [21] KLIBI, W., A. MARTEL y A. GUITOUNI, «The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review.», *European Journal of Operation Research*, **203**, 2010.
- [22] LIU, H., F. LI, L. XU y B. HAN, «The impact of socio-demographic, environmental, and individual factors on urban park visitation in beijing, china.The emerging area of emergency management and engineering», *Journal of Cleaner Production in press*, 2015.
- [23] MAKRI, M.-C. y C. FOLKESSON, *Accesibility Measures for Analyses of Land Use and Travelling with Geophical Information Systems*, 1999.
- [24] MARIANOV, V. y C. RE VELLE, *Siting emergency services. In Facility Location: A Survey of Applications and Methods*, 1995.
- [25] MARTÍ, R.
- [26] MORALES, L. y S. PALACIOS, *Localización de instalaciones y asignación de recursos mediante un algoritmo heurístico, para la atención post-desastre, en caso de inundación o remoción de masa*, 2017.
- [27] OWEN, S. H. y M. DASKIN, «Strategic facility location: A review.», *European Journal of Operation Research*, **111**(3), págs. 423–447, 1998.

- [28] PAPA, E., C. SILVA, M. BROMMELSTROET y A. HULL, «Accessibility instruments for planning practice: A review of European experiences.», *The Journal of Transport and Land Use*, 2016.
- [29] REVELLE, C., H. EISELT y M. DASKIN, «A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science.», *European Journal of Operation Research*, **184**, 2008.
- [30] SCHILLING, D., D. VAIDYANATHAN y L. R. BARKHI, «A review of covering problems in facility location.», *Location Science*, **1**(1), págs. 25–55, 1993.
- [31] SHEU, J., «Challenges of emergency logistics management.», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **43**(6), págs. 655–9, 2007.
- [32] SÁNCHEZ-GARCÍA, S., D. ATHANASSIADIS, C. MARTÍNEZ-ALONSO, E. TOLOSANA, J. MAJADA y E. CANGA, «A gis methodology for optimal location of a wood
red power plant: Quanti
cation of available woodfuel, supply chain costs and ghg emissions.», *Journal of Cleaner Production.*, **157**, 2017.
- [33] STEPEHSON., *Logística*, primera edición, DHA, Wisconsin, 1993.
- [34] TALBI, E., *Metaheuristics: from design to implementation*, 2009.
- [35] TOMASINI, R. y L. VAN WASSENHOVE, *Humanitarian Logistics*, 2009.
- [36] TOREGAS, C., A. SWAIN, C. REVELLE y L. BERGMAN, «Optimal location under time or distance constraints.», *Papers of the Regional Science Association.*, **28**, 1972.
- [37] TOREGAS, C., R. SWAIN, C. REVELLE y L. BERGMAN, «The location of emergency service facilities.», *Operations Research*, **19**(6), págs. 1363–1373, 1971.

-
- [38] TUFEKCI, S. y A. WALLACE, «The emerging area of emergency management and engineering», *IEEE Transactions on Engineering Management.*, **45**(2), págs. 103–105, 1998.
- [39] WASSENHOVE, L., «Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear.», *The Journal of the Operational Research Society*, **57**(5), págs. 475–89, 2006.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Beatriz Alejandra Jiménez López

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Logística y Cadena de Suministro

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES EN RESPUESTA
A SITUACIONES DE EMERGENCIA CONSIDERANDO INDICADORES DE
ACCESIBILIDAD

Nació el 28 de febrero de 1994, en Monterrey, Nuevo León, México. Egresó en el 2016 de la carrera de Ingeniero Administrador de Sistemas de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Cuenta con experiencia como docente en el nivel medio superior.